

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

ESTUDIO DE LOS PATRONES DE COLMATACIÓN EN

LOS SUMIDEROS DE LA CUENCA DE SANT MARTÍ

CÓDIGO: 711-TES-CA-6566

ETSECCPB (UPC)

INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Autor/a

JOAN PARÉS VELARDE

Tutor/a

MANUEL GÓMEZ VALENTÍN

Departament

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA, MARÍTIMA Y AMBIENTAL

Intensificació

INGENIERÍA HIDRÁULICA

Data

14 DE MAYO DE 2014

AGRADECIMIENTOS

Esta tesina es el resultado de muchos meses de trabajo durante los que he recibido el apoyo y la ayuda de muchas personas, sin las cuáles hubiera sido un trabajo mucho más difícil o casi imposible.

Primeramente, me gustaría agradecer al profesor Manuel Gómez la dedicación, atención y paciencia que siempre ha mostrado y por ayudarme cuando lo he necesitado. La realización de esta tesina no hubiera sido posible sin su ayuda, orientación y consejos.

De la misma manera, quería agradecer el tiempo dedicado por el doctorando Jackson Tellez en ayudarme durante los ensayos de laboratorio, así como por su dedicación y disponibilidad en todo momento.

Por último, agradecer a mi familia y amigos por el apoyo moral recibido, no sólo durante estos meses, sino a lo largo de toda la carrera, estando siempre presentes tanto en los buenos como en los malos momentos.

RESUMEN

Dentro del sistema de drenaje de una ciudad, el sistema de sumideros es el encargado de introducir en la red de alcantarillado las aguas de escorrentía producidas por las tormentas caídas. El diseño de dicho sistema de sumideros, la elección de los modelos adecuados y su ubicación es uno de los puntos fundamentales del sistema de drenaje. La hidráulica de estos sumideros ha recibido atención en los últimos años pero pocos fabricantes proporcionan la capacidad hidráulica de captación de cada sumidero. Además dichos datos suelen ser considerando agua limpia, mientras que en la realidad de la cuenca, numerosos sumideros pueden estar total o parcialmente colmatados, hecho que debería ser tenido en cuenta en los diseños. En este trabajo, se presenta una metodología para considerar los efectos hidráulicos sobre el sumidero derivados de la colmatación. A partir de una inspección de los sumideros de una cuenca, se buscan patrones de colmatación, formas repetitivas observadas en la colmatación de los sumideros, y la frecuencia de ocurrencia de los mismos. Se somete a ensayo hidráulico el sumidero colmatado, obteniéndose la cantidad de agua que puede ser captada por cada uno de ellos, y obteniéndose así el factor de reducción en la capacidad de captación a aplicar a cada uno de los patrones de colmatación y que puede ser utilizado en los estudios hidráulicos de escorrentía en la ciudad.

PALABRAS CLAVES: Sumideros, colmatación, captación de agua superficial

ABSTRACT

Inside the drainage system of a city, the set of inlets is the one in charge of introducing in the sewer net the runoff produced by the local storms. The design of this system of inlets, the selection of the appropriate models and their location is one of the fundamental points of the drainage system design. The hydraulics of these drains has received attention in the last years but few inletmakers provide the hydraulic capacity of each drain. In addition, these data are usually considering clean water, while in the reality of the basin, numerous inlets can be total or partially clogged, a point that should be kept in mind in the design process. In this work, we show up a methodology to consider the hydraulic effects over the inlet due to clogging. We start from a visual inspection of the inlets drains along the basin, looking for clogging patterns, repetitive forms observed in the clogging of the inlets, and their associated frequency. After that, we do hydraulic tests to the clogged inlet, obtaining the real quantity of water that can be captured by each one of them, and through this way, we can define the reduction factor in the hydraulic capacity to apply to each one of the clogging patterns and that can be used in the hydraulic studies of runoff along the city.

KEYWORDS: Inlet, clogging, surface water catchment

Índice

Listado de Figuras

Listado de Tablas

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	4
3. La cuenca urbana de Sant Martí.....	5
3.1 Introducción	5
3.2 Situación y características.	5
3.3 Tratamiento de datos previo.....	9
3.4 Estudio de campo	11
3.5 Identificación de los patrones de colmatación	19
3.6 Observaciones del estudio de campo	28
4. Resultados del Estudio de campo.....	30
4.1 Patrones de colmatación.....	30
4.2 Frecuencias de los patrones de colmatación	31
4.3 Distribución espacial de los patrones de colmatación.....	33
4.4 Resumen de las estadísticas del estudio de campo	38
5. Parámetros que alteran la capacidad de captación de una reja.....	39
5.1 Introducción	39
5.2 Estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia.....	40
5.3 Identificación de las rejillas a ser ensayadas en el laboratorio.....	41
6. Ensayos en el laboratorio.....	42
6.1 Descripción de la instalación experimental	42
6.1.1 Instalaciones fijas del laboratorio.....	43
6.1.2 Instalación de ensayo de los imbornales.....	43
6.2 Condiciones de ensayo	44
6.2.1 Rango de caudales de ensayo	44
6.2.2 Rango de pendientes de ensayos.....	45
7. Análisis de los resultados.....	46
7.1 Introducción	46
7.2 Reja modelo TEIDE: Patrón de colmatación C1.....	47
7.3 Reja modelo TEIDE: Patrón de colmatación C2.....	55
7.4 Reja modelo BARCELONA: Patrón de colmatación C3	66

8. Factores de seguridad en la colmatación de los sumideros.....	77
8.1 Situación actual	77
8.2 Análisis y definición de coeficientes de seguridad	78
8.3 Metodología propuesta.....	83
9. Conclusiones	84
10. Referencias bibliográficas	87
Anejo A: Patrones de colmatación de los sumideros de la cuenca de Sant Martí	
Anejo B: Planos en AutoCAD de la cuenca de Sant Martí	
Anejo C: Valores teóricos de los parámetros A y B para todas las rejillas	
Anejo D: Resultados experimentales de la rejilla nº6 Teide con patrón de colmatación C1 y C2	
Anejo E: Gráficas de los resultados experimentales de la rejilla nº 6 Teide con patrón de colmatación C1 y C2	
Anejo F: Resultados experimentales de la rejilla nº5 Barcelona limpia y con patrón de colmatación C3	
Anejo G: Gráficas de los resultados experimentales de la rejilla nº 5 Barcelona limpia y con patrón de colmatación C3	

Listado de Figuras

Figura 3.2.1. Situación del distrito de St. Martí en la ciudad de Barcelona.....	5
Figura 3.2.2. Situación de la ciudad de Barcelona y de la cuenca de Sant Martí.....	6
Figura 3.2.3. Situación de la cuenca de Sant Martí.....	6
Figura 3.2.4. Barrios del distrito de Sant Martí y en azul, su cuenca de drenaje.....	7
Figura 3.2.5. Mapa de pendientes de la zona de Barcelona.....	7
Figura 3.2.6. Mapa de pendientes de la zona de estudio (St. Martí).....	8
Figura 3.3.1. Plano en formato AutoCAD cedido por CLABSA, con la posición y modelo de las rejas de toda la cuenca de Sant Martí.....	9
Figura 3.3.2. Clasificación de los imbornales de la cuenca urbana de Sant Martí.....	10
Figura 3.4.2. Conjunto de sumideros seleccionados de la red de drenaje de la cuenca de Sant Martí para su posterior inspección visual.....	13
Figura 3.4.5. Plano de ubicación del conjunto de imbornales seleccionados de la Cuenca urbana de St. Martí para su inspección visual.....	17
Figura 3.4.6. Mapa del itinerario seguido en un día típico de inspección de los sumideros en la cuenca de Sant Martí.....	18
Figura 3.5.3. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.....	21
Figura 3.5.5. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.....	23
Figura 3.5.7. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.....	25
Figura 4.1.1. Ejemplo de una mala construcción de la reja R-121.....	30
Figura 4.3.1. Distribución espacial de los patrones de la reja R-121 en la cuenca de Sant Martí.....	33
Figura 4.3.2. Distribución espacial de los patrones de la reja IMPU en la cuenca de Sant Martí.....	34
Figura 4.3.3. Distribución espacial de los patrones de la reja Barcelona en la cuenca de Sant Martí.....	35
Figura 4.3.4. Distribución espacial de los patrones de la reja Teide en la cuenca de Sant Martí.....	36
Figura 4.3.5. Distribución espacial de los patrones de la reja Ebro en la cuenca de Sant Martí.....	37
Figura 6.1.1. Plataforma de ensayo para las rejas.....	42
Figura 6.2.1.1. Imbornal TEIDE en la plataforma, antes y durante el ensayo.....	44
Figura 7.2.1. Sumidero TEIDE con el patrón C1 y dirección del flujo de agua.....	47
Figura 7.2.2. Gráfica E – Calado para la reja Teide con el patrón de colmatación C1.....	48
Figura 7.2.3. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 para un caudal de 150 l/s.....	49
Figura 7.2.4. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 para un caudal de 50 l/s.....	49
Figura 7.2.5. Eficiencias registradas en la reja TEIDE con el patrón de colmatación C1, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (l_x) y longitudinal (l_y).....	50
Figura 7.2.8. Curva de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatada con el patrón C1.....	52

Figura 7.2.9. Curva de eficiencia para la reja Teide colmatada con el patrón C1.....	53
Figura 7.2.10. Resumen curvas de eficiencia para la reja Teide limpia y colmatada con el patrón C1.....	53
Figura 7.3.1. Sumidero TEIDE con el patrón C2.....	55
Figura 7.3.2. Gráficas E – Calado para la reja Teide con el patrón de colmatación C1 y C2.....	56
Figura 7.3.3. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 y C2 para un caudal de 150 l/s.....	58
Figura 7.3.4. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 y C2 para un caudal de 50 l/s.	59
Figura 7.3.5. Pérdida de eficiencia registrada en el modelo de reja TEIDE, con el patrón de colmatación C2 respecto al patrón C1 para los caudales de 100 y 200 l/s.....	60
Figura 7.3.6. Eficiencias registradas en la reja TEIDE con el patrón de colmatación C2, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (I_x) y longitudinal (I_y).	61
Figura 7.3.9. Curva de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatada con el patrón C2.	63
Figura 7.3.10. Curva de eficiencia para la reja Teide colmatada con el patrón C2.....	64
Figura 7.3.11. Curva de eficiencia para la reja Teide para estado colmatado C1 y C2.....	64
Figura 7.3.12. Resumen curvas de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatado con el patrón C2.....	65
Figura 7.4.1. Sumidero BARCELONA con el patrón C3 y dirección del flujo de agua.	66
Figura 7.4.2. Gráficas E – Calado para la reja Barcelona en estado limpio y con el patrón de colmatación C3.....	67
Figura 7.4.3. Eficiencia registrada en la reja Barcelona, en condiciones limpias y con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 150 l/s.....	69
Figura 7.4.4. Eficiencia registrada en la reja Barcelona, en condiciones limpias y con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 50 l/s.	70
Figura 7.4.5. Pérdida de eficiencia registrada en el modelo de reja BARCELONA con el patrón de colmatación C3 para un caudal de 150 l/s respecto a la misma reja en condiciones limpias.....	71
Figura 7.4.6. Eficiencias registradas en la reja BARCELONA con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (I_x) y longitudinal (I_y).	72
Figura 7.4.9. Curva de eficiencia para la reja Barcelona para su estado limpio y colmatada con el patrón C3.....	74
Figura 7.4.10. Curva de eficiencia para la reja Barcelona para su estado con el patrón C3.....	75
Figura 7.4.11. Resumen curvas de eficiencia para la reja Barcelona para su estado limpio y colmatado con el patrón C3.....	75
Figura 8.2.1. Ajuste Potencial para la reja Teide con patrón de colmatación C2.....	78
Figura 8.2.2. Ajuste Potencial para la reja Barcelona Limpia.....	79
Figura 8.2.3. Variación $Co = \Delta E/E$ frente Q/y para la reja Teide.	79
Figura 8.2.4. Variación $Co = \Delta E/E$ frente Q/y para la reja EBRO.....	80
Figura 8.2.5. Variación $Co = \Delta E/E$ frente Q/y para la reja IMPU.....	80
Figura 8.2.6. Variación $Co = \Delta E/E$ frente Q/y para la reja Barcelona.	80

Listado de Tablas

Tabla 3.2.7. Principales características de la cuenca de St. Martí.....	8
Tabla 3.4.1. Modelos de sumideros seleccionados de la cuenca de St. Martí para su inspección visual	11
Tabla 3.4.3. Desglose de los diferentes modelos agrupados en cada categoría.....	14
Tabla 3.4.4. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí.....	15
Tabla 3.5.1. Criterio establecido para clasificar los patrones observados en las diferentes rejillas de la cuenca.....	19
Tabla 3.5.2. Resultados obtenidos para cada modelo y patrón, del cociente entre el área de huecos colmatada (A_c) y el área total de huecos de la rejilla (A_h).....	19
Tabla 3.5.4. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C1.	22
Tabla 3.5.6. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C2	24
Tabla 3.5.8. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C3.	26
Tabla 4.2.1. Frecuencias asociadas a cada uno de los patrones observados en el estudio de campo de la cuenca de Sant Martí.	32
Tabla 4.4.1. Resumen estadístico a partir de los datos recogidos en la inspección visual en la cuenca de Sant Martí.	38
Tabla 5.3.1. Parámetros A, B para cada patrón de colmatación de las rejillas.....	41
Tabla 7.2.6. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto la rejilla limpia ideal.....	51
Tabla 7.2.7. Variación de los Parámetros A y B, entre las aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.....	51
Tabla 7.3.7. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto la rejilla limpia ideal Teide.....	62
Tabla 7.3.8. Variación de los Parámetros A y B, según las aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.....	62
Tabla 7.3.13. Diferencia entre los parámetros A y B experimentales de la rejilla Teide para los patrones C1 y C2.....	65
Tabla 7.4.7. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto al estado ideal limpio.....	73
Tabla 7.4.8. Variación de los Parámetros A y B, según las aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.....	73
Tabla 8.2.7. Valores $\Delta E/E = C_o$ de reducción de la eficiencia, para los 3 patrones de colmatación, asumiendo condiciones de flujo $Q/y = 10$	81
Tabla 8.2.8. Valores de las frecuencias de aparición de los patrones C1, C2 y C3 para las rejillas más comunes de la cuenca de Sant Martí.....	82
Tabla 8.2.9. Valores $\Delta E/E = C_o$ teóricos de reducción de la eficiencia, para los 3 patrones de colmatación, asumiendo condiciones de flujo $Q/y = 10$	82

1. Introducció

La razón de ser de las calles es la de facilitar el tránsito de personas y mercancías en el día a día de una ciudad. Sin embargo, durante un episodio de lluvia, las calles deben recoger y conducir la concentración de agua caída. Si el sistema de recogida del agua en la calle no está diseñado de manera adecuada, se pueden alcanzar niveles y caudales significativos, haciendo que la calzada se degrade hasta alcanzar un nivel de servicio inaceptable durante el suceso de lluvia.

El camino que sigue el agua caída durante un suceso de precipitación pasa por la transformación de la lluvia en escorrentía y su circulación en superficie, la introducción en la red de drenaje, la circulación por la red y el posterior vertido a un medio receptor exterior, sea un río, un mar, un lago, etc..

El medio de la escorrentía y circulación en superficie resulta ser la propia calle, y recoge las aguas depositadas en diversas superficies como la calzada, las aceras, los tejados a través de los diversos canalones y bajantes. Este hecho conlleva un recorrido del agua por superficies de distintas naturalezas y diferentes coeficientes de rugosidad que influyen en el tiempo de concentración.

Por el contrario, la segunda de las vías se encarga del transporte de las aguas a través del subsuelo, hasta el punto de vertido exterior. Este punto normalmente será una EDAR, un río o el mar.

En poblaciones con construcciones antiguas, nos podemos encontrar con multitud de viviendas cuyas escorrentías procedentes de los tejados se vierten directamente a la calle, sin estar conectados a la red. En la mayoría de ciudades desarrolladas y en sus construcciones de las últimas décadas, el agua que cae en un suceso de precipitación en los tejados es recogida y conectada directamente a la red de drenaje pero el agua restante, circula por la calle, pudiendo causar inundaciones de mayor o menor gravedad en función de la precipitación caída, de su intensidad y de la geografía del entorno, provocando molestias a los ciudadanos en su día a día y daños materiales o incluso, personales.

La ingeniería, a través de la Hidrología Urbana ha procurado dar solución a los problemas de carácter hidrológico originados en la ciudad mediante el análisis de los dos procesos que se dan lugar en ella: la transformación de la lluvia en escorrentía (analizando las pérdidas de precipitación en la interceptación, la evapotranspiración y la infiltración, además de las pérdidas en depresiones del terreno), y la propagación del flujo a través de la cuenca.

Con el paso de los años, la hidráulica ha conseguido dar respuesta a los interrogantes surgidos, avanzando en el estudio de la red de drenaje y aportando diversos modelos con resultados favorables que han servido para una mejor preparación para el diseño de la red de drenaje de una ciudad. Se trata de evitar perturbaciones en superficie, puntos bajos favorables al encharcamiento, ayudando a un recorrido del agua más fluido, ya sea en la superficie de la ciudad como en su subsuelo.

De esta manera la hidrología consigue abarcar dos campos de estudio: la cuenca de drenaje que nos da información de la cantidad de agua que circula en cada punto y en cada momento y la propia red de drenaje con el caudal que circula por ella.

Para enlazar estos dos campos de estudio, falta profundizar en el sistema de captación, el cual nos une las redes de drenaje superficial y subterránea.

El sistema de captación es el encargado de recoger el agua que circula por la calle y trasladarla al sistema de drenaje subterráneo. Está formado por el conjunto de rejillas distribuidas en la superficie de la ciudad. A día de hoy, el mercado ofrece una amplia gama de rejillas/imbornales. La geometría y las dimensiones de éstas son en la mayoría de casos arbitrarias y resultan ser, a menudo, modeladas según criterios de diseño como la estética sin tener en cuenta su funcionalidad. Desde las distintas administraciones se siguen otros parámetros a la hora de optar por un modelo u otro priorizando algunos aspectos como pueden ser su coste económico, la continuidad de diseño de las calles

colindantes o la estética en el entorno por encima de la funcionalidad que puede aportar.

Sería recomendable que en el momento de diseñar una calle o en la restitución y mejora del conjunto de la red de drenaje, se tuviera en cuenta para la elección del modelo de la reja, el caudal que es capaz de captar de la escorrentía que circula por la calle. El problema es que los fabricantes de imbornales no dan ningún dato sobre la capacidad hidráulica de las diferentes rejass así que hay que acudir a los pocos estudios existentes.

En el año 1997 el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la ETSECCPB realizó una serie de ensayos dedicados a obtener la capacidad de captación de las rejass más comunes en las calles de la ciudad condal. Mediante un tratamiento de los resultados obtenidos, se planteó una primera relación lineal entre la eficiencia de captación de las rejass y el calado del flujo en la sección anterior a la entrada al imbornal. Dependiendo de qué caudal circulase por la calle la pendiente de la recta resultaba distinta, por lo que se planteó una función de ajuste tipo hiperbólico entre los caudales ensayados y las pendientes de las rectas de ajuste.

HR Wallingford (1998) proponía una nueva metodología de estudio que relacionaba la eficiencia con el cociente caudal/calado. Este estudio sugería un nuevo ajuste lineal entre ambos parámetros.

Pablo Martínez (2000) retomó este estudio ampliando el rango de ensayos, obteniendo valores Q/y hasta 8 (mientras que HR Wallingford llegó hasta Q/y de 1,5). De esta manera observó que la relación que existe entre los datos en el espacio $E-Q/y$ era de tipo potencial y que en ella intervenían los parámetros relacionados con las características geométricas de la propia reja.

María José Mur Abad (2002) dio un paso más en el estudio de las eficiencias, planteando qué pasa al aumentar el rango de dimensiones de las rejass llegando a la conclusión que el aspecto geométrico de la reja condiciona la eficiencia de captación de la reja, sobretodo, la disposición del área de huecos dando por bueno el ajuste propuesto en el año 2000 por Pablo Martínez.

De estos ensayos se desprende que se puede caracterizar la capacidad hidráulica de captación de los sumideros, pero eso se hace siempre con agua limpia y sin aporte ninguno de material sólido. La experiencia nos dice que en una ciudad, aunque se realice el lavado de las calles de forma frecuente, siempre existirá una capa de polvo, a la cual, se le sumará restos de la vegetación existente en el entorno así como parte de la basura que no se ha podido recoger. Cuando se da un suceso de lluvia, el agua de la escorrentía arrastra la suciedad existente en la calle hasta llegar a los sumideros. Dependiendo de la cantidad de restos que son arrastrados y de su tamaño, la reja sufrirá una continua obstrucción de sus orificios, reduciendo la capacidad de ésta para la captación del agua circulante, y por esta razón de forma genérica, en el diseño de vías urbanas, se suele adoptar un coeficiente de seguridad $C_0 = 0,5$ que reduce la capacidad de captación del sumidero.

Guillem Hidalgo (2009) fue un paso más allá y realizó un extenso estudio en la cuenca de Riera Blanca sobre los patrones de colmatación existentes en los sumideros más comunes, para después caracterizar mediante ensayos hidráulicos de algunas rejass con dichos patrones, cuál era la pérdida de captación real a nivel de calle.

De este estudio se concluye que la pérdida real de captación es superior a las pérdidas teóricas de captación por colmatación calculadas en estudios anteriores, debido a que las fórmulas teóricas no tienen en cuenta del todo algunos aspectos geométricos como por ejemplo, la disposición del área de huecos.

Por último, se demostró que la eficiencia de las rejass colmatadas con diferentes patrones, también pueden caracterizarse con una relación del tipo potencial igual que cuando las rejass están limpiass.

El siguiente paso es continuar con el estudio de los patrones de colmatación de los sumideros, analizando información real a nivel de calle, y confirmar mediante ensayos hidráulicos de otras rejass comunes colmatadas, si las observaciones y comportamientos recogidos en el estudio anterior, son válidos y aplicables a nivel global a todas las cuencas de Barcelona.

Por este motivo en esta tesina, se realizará un amplio estudio del comportamiento real de los sumideros en las cuencas del distrito de Sant Martí en Barcelona, analizando los sumideros más comunes y sus diferentes patrones de colmatación, para después mediante ensayos hidráulicos en el laboratorio, caracterizar la eficiencia hidráulica de algunos de los imbornales colmatados y, además de comparar estos resultados con los estudios anteriores, proponer un sistema alternativo de diseño de vías urbanas, fijando en función de la colmatación existente, unos coeficientes de seguridad inferiores y más ajustados a la realidad, en vez de seguir el modelo conservador actual que adopta un mismo coeficiente para todos los sumideros de la cuenca.

2. Objetivos

A día de hoy, los estudios de caracterización hidráulica de los diferentes sumideros se realizan en condiciones ideales: aguas limpias y agujeros sin obstrucción alguna. En esta tesina, se trabajará para llegar a una mejor aproximación a la realidad con el objetivo de observar la evolución de la capacidad de captación en función del patrón de colmatación de los modelos de sumideros a estudiar.

Una vez seleccionada la cuenca urbana de estudio de la ciudad, se pretende obtener:

- Definición y clasificación de los sumideros existentes en la cuenca urbana. Selección de aquellos modelos de alcantarillas que tengan mayor presencia en el entorno urbano de estudio.
- Revisar el inventario de los sumideros existentes en la cuenca urbana de estudio mediante visitas de campo y control fotográfico.
- Inspección visual del estado de los sumideros en época seca y también después de varios sucesos de lluvia.
- Análisis del estado de colmatación de los imbornales: identificación de patrones de colmatación para los diferentes modelos de imbornales del estudio.
- Frecuencia de rejillas colmatadas, respecto al total, y con respecto a cada patrón de colmatación definido.
- Comparar los diversos patrones de colmatación identificados con patrones de colmatación anteriormente obtenidos en estudios previos.
- Comprobar si la distribución espacial de los patrones observados en los sumideros colmatados sigue una distribución uniforme, tal y como se sugiere en estudios anteriores. Comprobar si la pendiente del terreno tiene algún efecto en los resultados anteriores.
- Ensayos de laboratorio a escala real de los sumideros que presenten los patrones de colmatación identificados en el estudio, para caracterizar la reducción en términos de eficiencia de captación de agua del sumidero colmatado.
- Definición de coeficientes de seguridad sobre la eficiencia de captación a utilizar en posteriores estudios y en la disposición de las rejillas en las calles.

3. La cuenca urbana de Sant Martí

3.1. Introducción

Para llevar a cabo el estudio de campo de esta tesina, se ha centrado su ámbito de trabajo en una cuenca urbana, entendiendo por ésta, la zona de la ciudad donde toda el agua de lluvia que cae en ella durante una precipitación, es recogida y evacuada a través de un solo punto.

Una vez comentado el significado de cuenca urbana, ubicaremos el estudio en la cuenca urbana de Sant Martí, dentro la ciudad de Barcelona, integrada en el distrito de St. Martí. El motivo de elegir esta cuenca urbana y no otra, es debido a que se encuentra en la parte baja de la ciudad, tiene muy poca pendiente y en teoría un mayor riesgo de colmatación de la red de alcantarillado.

3.2 Situación y características

Situada en la costa del mar Mediterráneo, Barcelona se asienta en una llanura formada entre los deltas de las desembocaduras de los ríos Llobregat al suroeste, y Besòs, en el noreste, y limitada por el sureste por la línea de costa, y por el noroeste por la sierra de Collserola (con la cima del Tibidabo, 516.2 m, como punto más alto) que sigue paralela la línea de costa encajando la ciudad en un perímetro muy definido (Figura 3.2.2). Su clima se caracteriza por lluvias cortas con altas intensidades.

El distrito de Sant Martí es uno de los diez en que se divide administrativamente la ciudad de Barcelona (Figura 3.2.1). Se sitúa en el límite noreste de la ciudad, y limita con el municipio de Sant Adrià del Besòs, y los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Horta - Guinardó y Sant Andreu. Comprende la mayor parte del territorio que le da nombre, el antiguo municipio de Sant Martí de Provençals.



Figura 3.2.1 Situación del distrito de St. Martí en la ciudad de Barcelona.

Es el segundo distrito más poblado, 232 000 habitantes (2009), cuarto en extensión (10,5 km²) -aunque segundo en extensión urbanizada-, sexto en densidad (22095 hab./km²) y concentra la mayor parte de las playas de Barcelona en sus 2.675 metros de litoral.

Actualmente el distrito se divide en diez barrios (Figura 3.2.4): El Camp de l'Arpa del Clot, El Clot, El Parc i la Llacuna del Poblenou, La Vila Olímpica del Poblenou, El Poblenou, Diagonal Mar i el Front Marítim del Poblenou, El Besòs i el Maresme, Provençals del Poblenou, Sant Martí de Provençals y La Verneda i la Pau.

La cuenca de drenaje de St. Martí (6,5 km² de superficie) se encuentra integrada dentro del distrito de Sant Martí (Figura 3.2.3 y 3.2.4) ocupando los barrios de El Poblenou, El Parc i la Llacuna del Poblenou, Provençals del Poblenou, Sant Martí de Provençals, El Clot, Diagonal Mar, El Besòs i el Maresme y La Verneda i la Pau.

Todas estas zonas tienen las mismas características morfológicas y por este motivo, no hará falta dividir la cuenca en subcuencas más pequeñas para definir, clasificar y estudiar la red de imbornales.

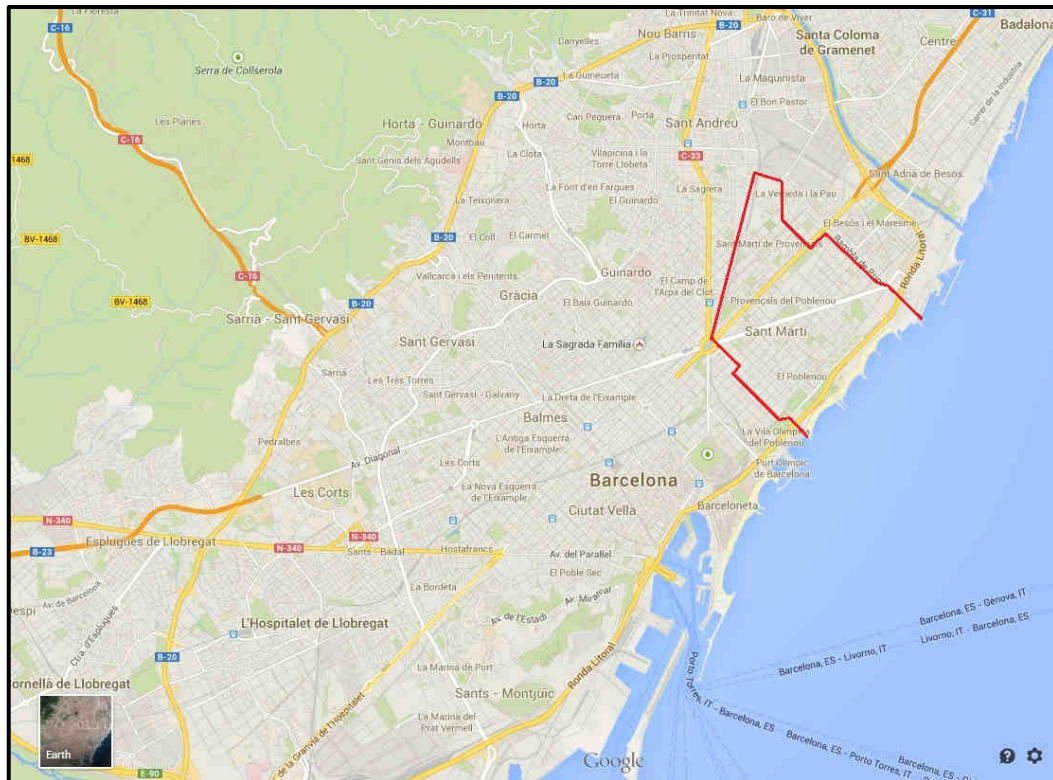


Figura 3.2.2. Situación de la ciudad de Barcelona y de la cuenca de Sant Martí.
 Fuente: Google Maps.

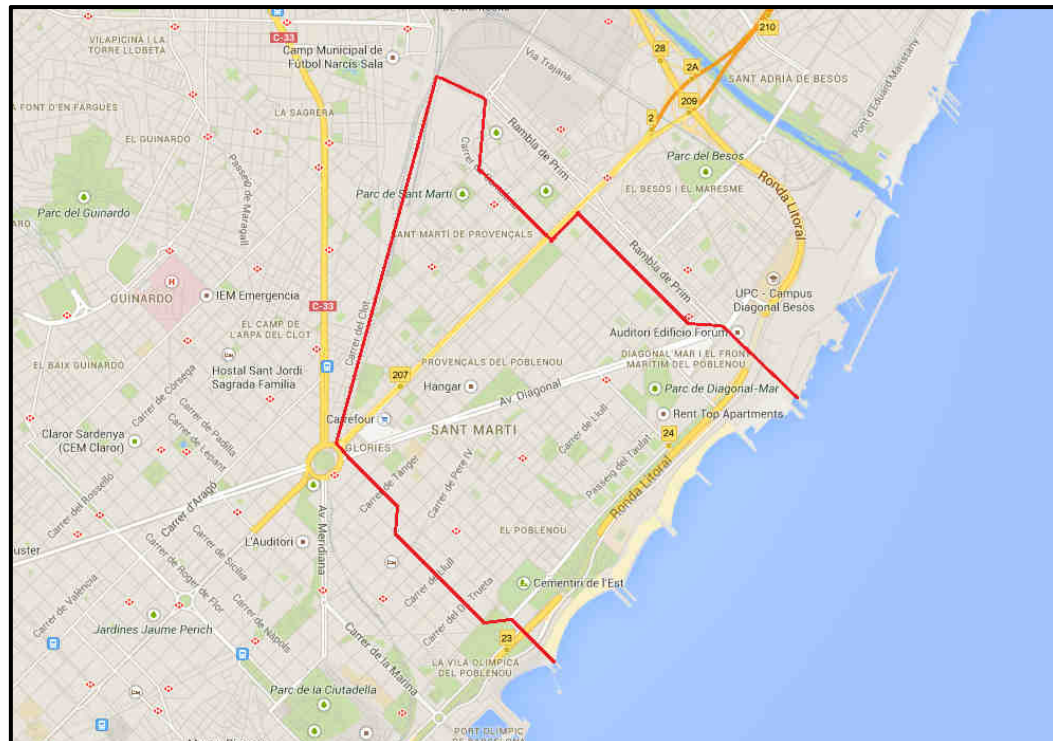


Figura 3.2.3. Situación de la cuenca de Sant Martí. Fuente: Google Maps.

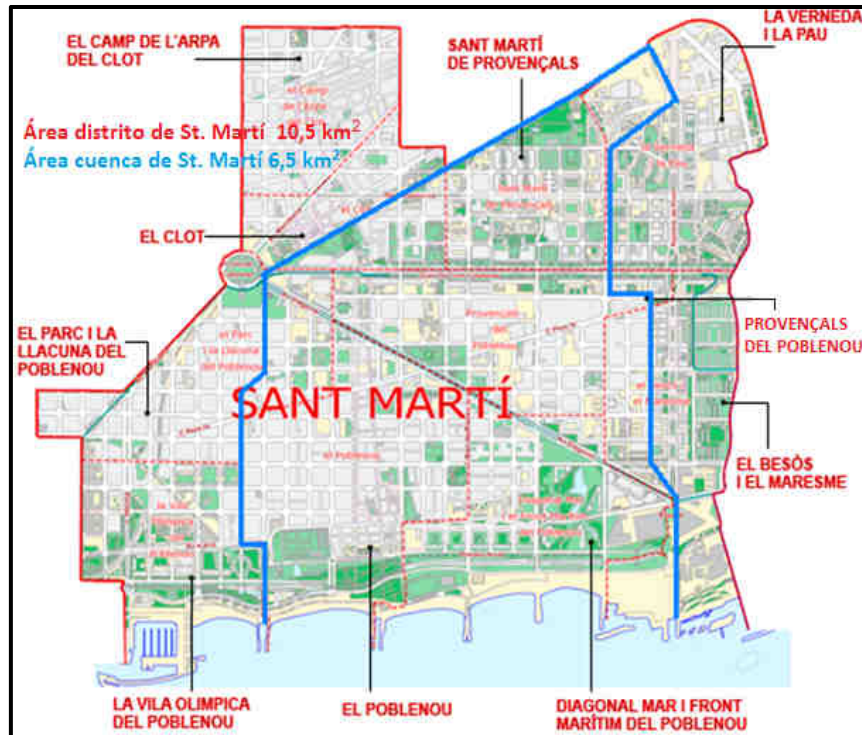


Figura 3.2.4. Barrios del distrito de Sant Martí y en azul, su cuenca de drenaje.

La cuenca de Sant Martí se encuentra situada en terrenos ganados al mar, sobre depósitos de gravas y arenas del delta del Besòs. Por ello tiene una topografía muy plana con pendientes muy pequeñas (0,1 - 0,5%). Solamente en la zona de la Gran Vía y en la zona sur antes de llegar a la Ronda Litoral, se encuentran algunas puntuales de hasta el 5%. En este último caso, se genera un punto bajo alrededor del Passeig del Taulat, que se puede inundar si se producen grandes lluvias que superan la capacidad de los sumideros de la zona. (Figura 3.2.6)

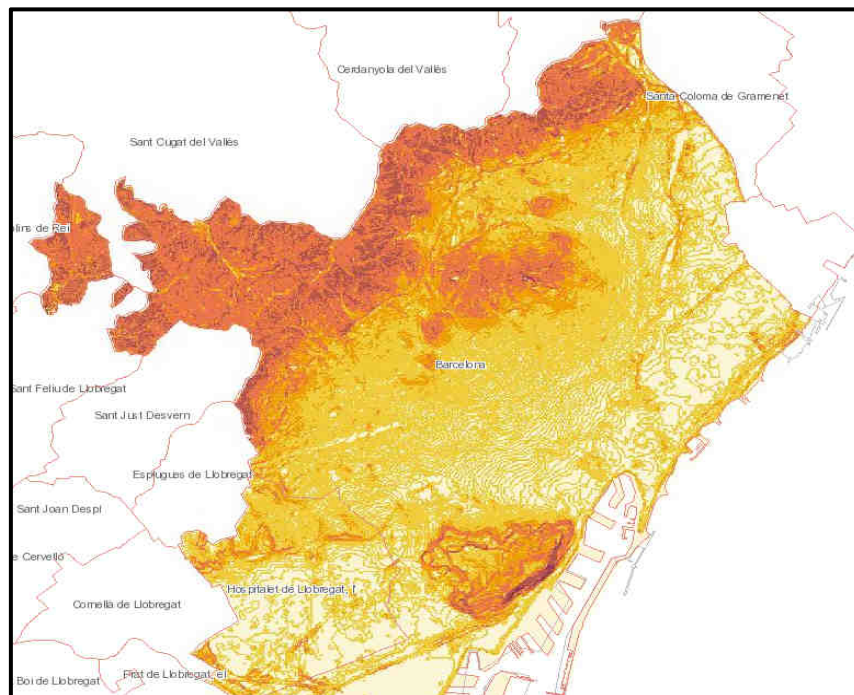


Figura 3.2.5. Mapa de pendientes de la zona de Barcelona.
 Fuente: Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

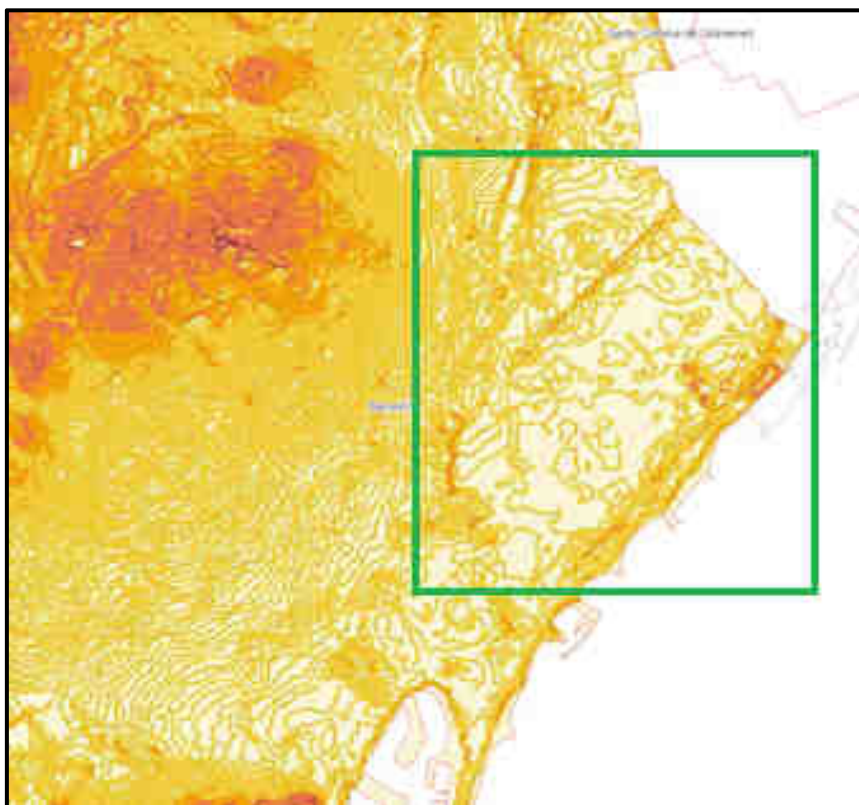


Figura 3.2.6. Mapa de pendientes de la zona de estudio (St. Martí).
Fuente: Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

En la siguiente tabla, se resumen las características principales de la cuenca de St. Martí:

Cuenca Urbana Sant Martí	
Longitud media	2,54 km
Área	6,49 km ²
Ancho medio	1,9 km
Cota superior	18 m
Cota inferior	1 m
Nº de sumideros	6946
Pendiente media	0,5 %
Pendiente máxima	5 %
Pendiente mínima	0,1%

Tabla 3.2.7. Principales características de la cuenca de Sant Martí.

3.3 Tratamiento de datos previo

Una vez delimitada la zona de estudio, se requirió la información de base de imbornales, cedida por la empresa de gestión del alcantarillado de Barcelona, CLABSA (Clavegueram de Barcelona S.A.), en la actualidad BCASA, Barcelona Ciclo del Agua S.A..

Esta información consta de una hoja Excel a modo de resumen de la red de drenaje y un plano en formato AutoCAD de la cuenca con la ubicación de las rejillas y su modelo (Figura 3.3.1)

Con el plano, sabremos la posición exacta mediante coordenadas UTM de cada una de las rejillas que conforman la extensa red de drenaje de la cuenca, y a la vez, se clasifican los imbornales según su modelo y si estos disponen de la colaboración o no de buzones/ventanas laterales en la captación del agua de escorrentía.

En la zona de estudio nos encontramos 6946 imbornales, de los cuales 6874 se clasifican en 98 tipos de imbornales, mientras que 72 se encuentran sin clasificar. Dado que el número de imbornales sin clasificar es muy poco importante (1,04 % del total), no será necesario hacer inspecciones adicionales para tenerlos en cuenta.

Se dará diferentes colores a cada modelo de rejilla según la cantidad de estas que se encuentren en la cuenca (Figura 3.3.2).

De esta manera, los colores azules engloban a las rejillas más utilizadas en la cuenca, siendo como requisito, un mínimo de 200 rejillas. Los colores anaranjados reúnen a las rejillas que van de 200 a 100, mientras que se utiliza el color verde para los modelos menos utilizados.

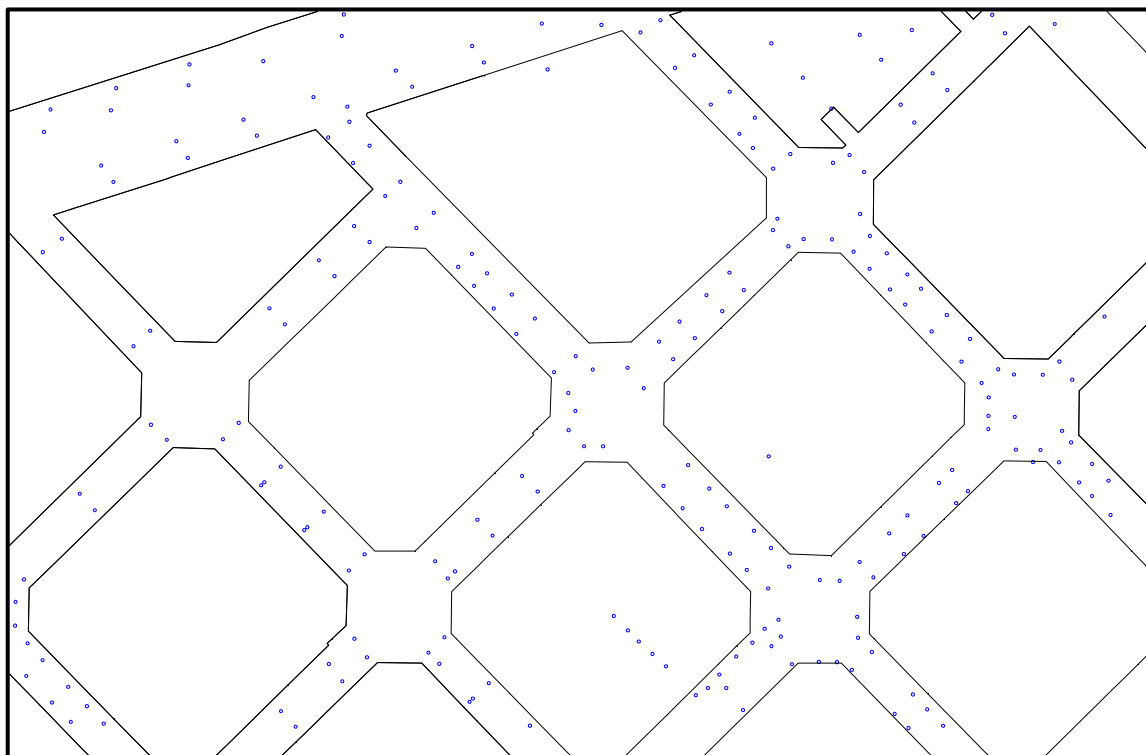


Figura 3.3.1. Plano en formato AutoCAD cedido por CLABSA, con la posición y modelo de las rejillas de toda la cuenca de Sant Martí.

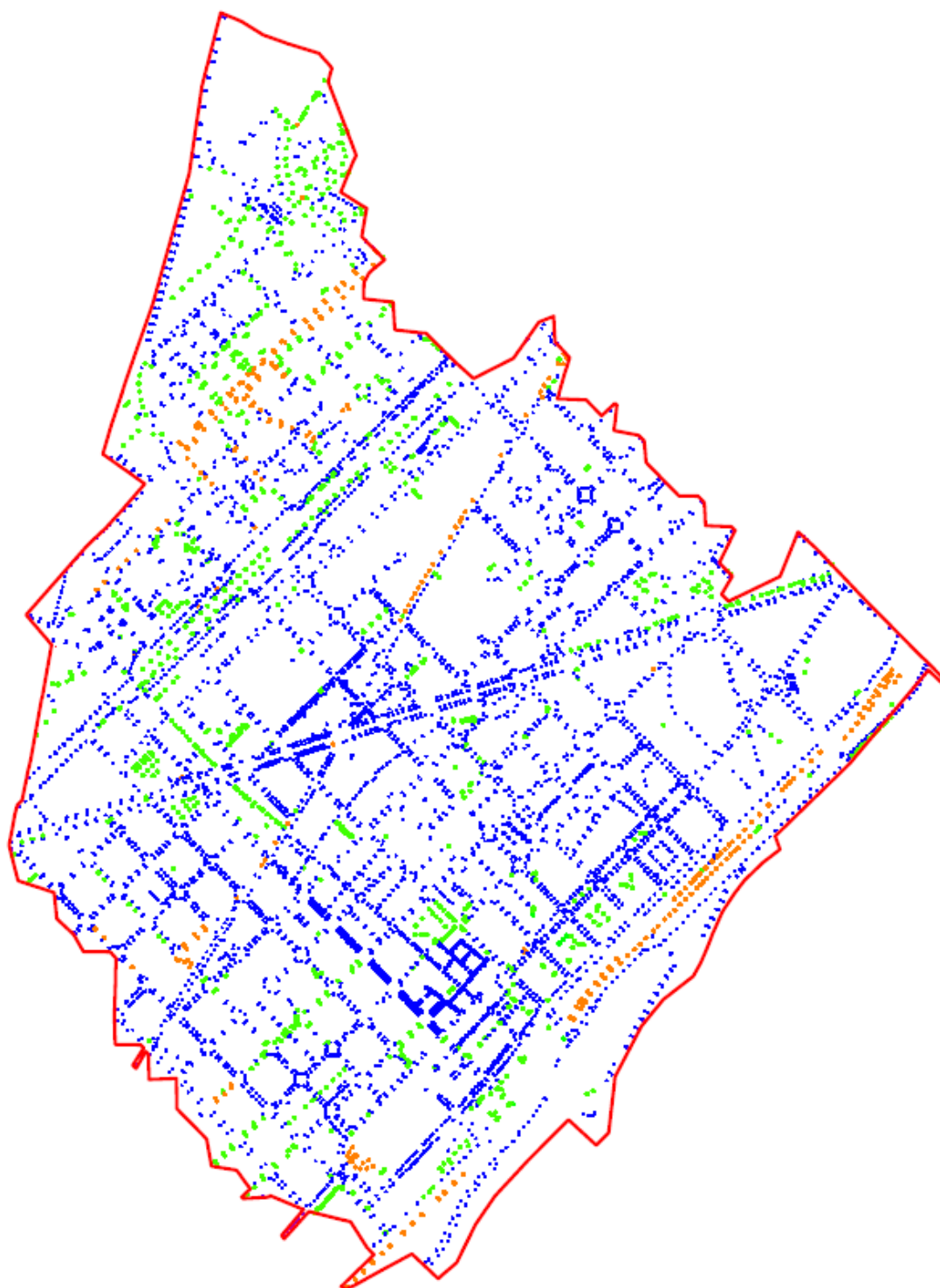


Figura 3.3.2. Clasificación de los imbornales de la cuenca urbana de Sant Martí.

3.4 Estudio de campo

Este estudio de campo se basa en la realización de un recorrido por la zona de la cuenca de Sant Martí.

La ciudad sufre remodelaciones en sus calles y uno de los elementos que los sufren en mayor medida son los propios imbornales, que o bien son retirados y reemplazados por otros modelos más modernos, se ven desplazados o simplemente, quedan sepultados por restos de obra. Incluso, en algún caso, la reja simplemente desaparece de la calle. Por esta razón, cuantos más imbornales se tengan en cuenta en el estudio, más posibilidades tendremos de hallar suficientes como para obtener los diferentes patrones de colmatación.

Para realizar el estudio de campo, dado que sería imposible por la premura de tiempo caracterizar el comportamiento de todos los modelos de imbornales, procederemos a la elección de aquellos sumideros que puedan aportar una mayor cantidad de datos de su estudio, entendiendo que serán aquellos que tengan una mayor presencia dentro de la cuenca.

Con la selección de los 7 modelos más comunes, contemplamos 5539 imbornales de un total de 6946, representando alrededor del 80 % del total de la red de sumideros de la cuenca de Sant Martí.

Estos modelos son los siguientes: E5, R-121, Impu, Meridiana, Delta/Barcelona, Teide y Onda/Ebro.

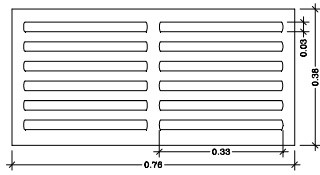
En la Tabla 3.4.1 se detallan los modelos de rejillas que entrarán dentro del estudio de campo. A su vez, se indica el número total de rejillas que existen dentro de la cuenca urbana tratada.

Modelo Sumidero	Total	Presencia en la red
Reja nº 1: E5	257	3,70%
Reja nº 2: R-121	425	6,12%
Reja nº 3: IMPU	616	8,87%
Reja nº 4: Meridiana	1162	16,73%
Reja nº 5: Delta/Barcelona	2226	32,05%
Reja nº 6: Teide	233	3,35%
Reja nº 7: Onda/Ebro	620	8,93%
Total	5539	79,74%
Total cuenca	6946	100%

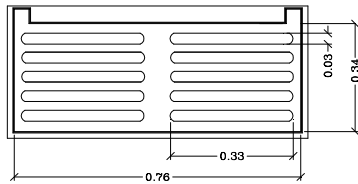
Tabla 3.4.1. Modelos de sumideros seleccionados de la cuenca de Sant Martí para su inspección visual.

Las diferentes rejillas seleccionadas se pueden observar mediante un esquema y fotografía en la Figura 3.4.2.

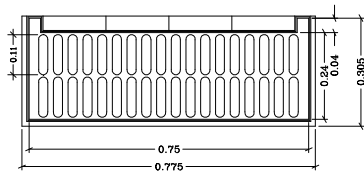
Reja 1
Modelo E5



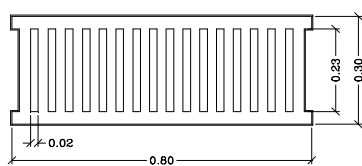
Reja 2
Modelo R-121
E10/E18



Reja 3
Modelo IMPU
E24/E33



Reja 4
Modelo Meridiana
E294/E305



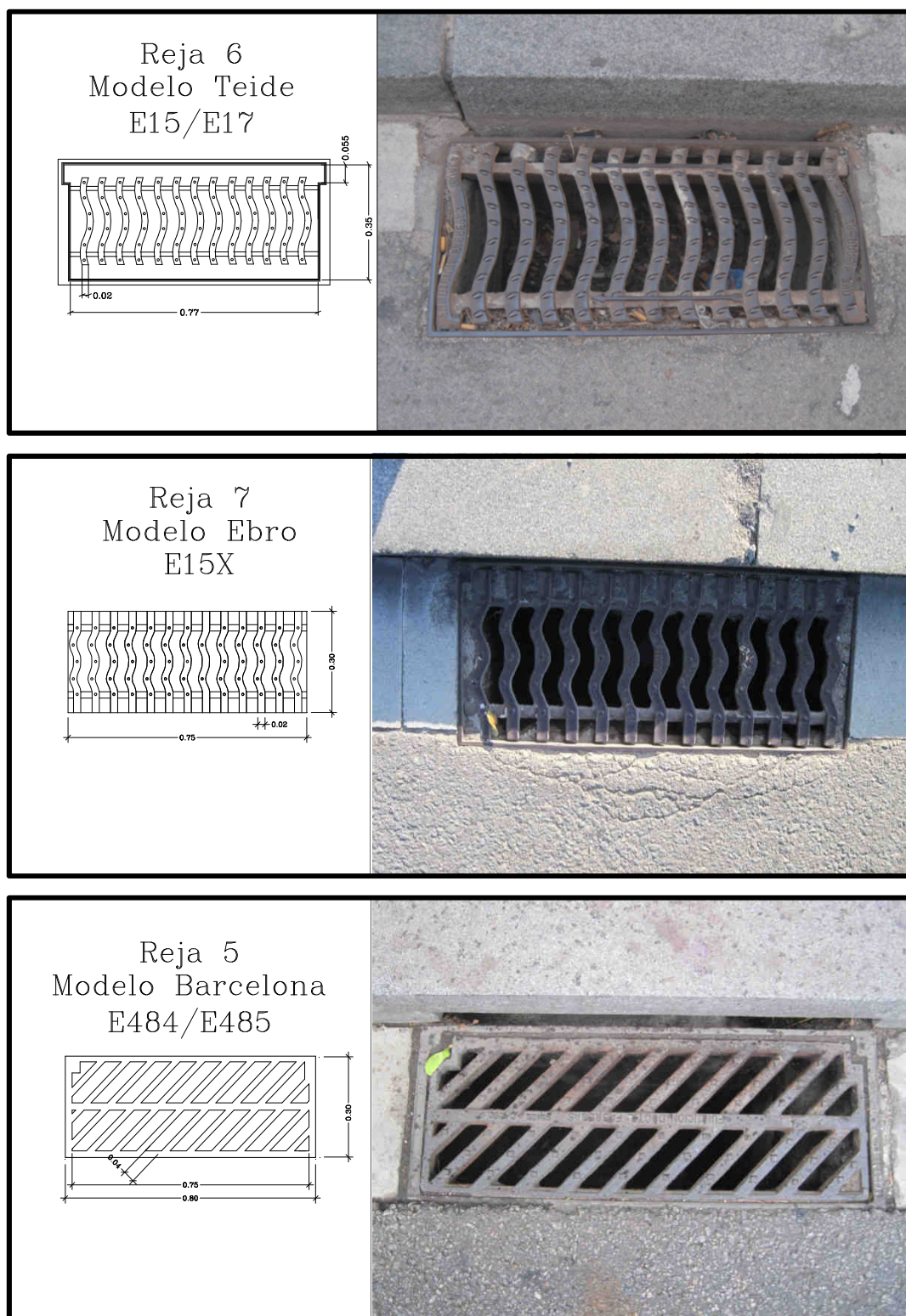


Figura 3.4.2. Conjunto de sumideros seleccionados de la red de drenaje de la cuenca de Sant Martí para su posterior inspección visual.

El hecho que encontremos dos modelos inicialmente distintos juntos (por ejemplo E24 y E33) incluidos dentro del mismo grupo de rejillas, es debido a que en el estudio realizado en el año 1997 [1], el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la ETSECCPB ejecutó una serie de ensayos sobre la capacidad de captación de las rejillas más comunes en la ciudad de Barcelona y cuyos resultados obtenidos, demostraron que el funcionamiento de una misma rejilla con o sin buzón es el mismo y la capacidad de captación no se ve incrementada por su presencia, y por lo tanto se pueden agrupar en una misma categoría.

En otros casos, se ha decidido agrupar rejillas diferentes en una misma categoría, debido a que sus características geométricas son muy similares y tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto ocurre porque algunos fabricantes de imbornales copian el diseño de imbornales de otras fundiciones, cambiando el nombre y alterando un poco las medidas para evitar problemas de patentes.

El desglose de los diferentes modelos agrupados en cada categoría, se puede apreciar en la Tabla 3.4.3. Es importante repetir que a efectos hidráulicos, cada categoría se comporta de la misma forma resultando en los mismos patrones de colmatación.

Categorías	Notación de modelos según el fabricante
Reja 1 – E5	E5
Reja 2 – R-121	E10 / E18 / E2 / E3 / E69
Reja 3 – IMPU	E24 / E33
Reja 4 – Meridiana	E294 / E305
Reja 5 – Barcelona	E413 / E432 / E434 / E484 / E485
Reja 6 – Teide	E15 / E17
Reja 7 – Ebro	E15X

Tabla 3.4.3. Desglose de los diferentes modelos agrupados en cada categoría.

Las características geométricas de las rejillas seleccionadas se encuentran definidas en la siguiente tabla (Tabla 3.4.4). Donde:

- A_g : Área mínima que engloba a todos los huecos de la rejilla (m^2).
- p : es el cociente en tanto por ciento, entre el área de huecos totales de la rejilla, A_h , y el valor A_g definido como $p = (A_h/A_g) \cdot 100$
- n_t : número de barras transversales de la rejilla.
- n_l : número de barras longitudinales de la rejilla.
- n_d : número de barras diagonales de la rejilla.

[1] Gómez, M., González, J. y Guerra, W. (1997 y 2002), *Informes de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las rejillas más comunes de Barcelona*. (Estudios realizados a petición de CLABSA). Departamento de Hidráulica de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Características geométricas de las rejillas sin colmatar

Nº Reja	Nombre	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Nº barras longitudinales (n_l)	Nº barras diagonales (n_d)	Nº barras transversales (n_t)	Área de huecos (A_h , mm ²)	Área que engloba a los huecos (A_g , mm ²)	Porcentaje de huecos (p, en %)
1	E5	733	344	7	0	1	106000	209000	50,72
2	R-121	752	330	6	0	1	128000	231000	55,41
3	Impu	775	289	2	0	17	121500	198500	61,21
4	Meridiana	721	237	0	0	15	74000	160000	46,25
5	Barcelona	772	257	1	13	0	104000	162000	64,20
6	Teide	770	360	2	0	13	188500	272000	69,30
7	Ebro	750	300	2	0	13	129000	232500	55,48

Tabla 3.4.4. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí.

Una vez tenemos bien definido el conjunto de rejas a inspeccionar, podemos establecer el criterio de inspección visual a seguir.

Dado que nos es imposible inspeccionar el total de 5539 de rejas que suman los 7 modelos escogidos, se crea un conjunto de imbornales de estudio con una distribución espacial uniforme, que abarque como mínimo, un 15% de rejas de cada modelo.

El motivo de repartir las rejas a inspeccionar de manera uniforme en la cuenca, es para demostrar si los patrones de colmatación muestran una distribución espacial uniforme o por lo contrario, si se encuentran concentrados en una parte de la cuenca.

Para tener en cuenta posibles problemas durante la inspección de campo, como imbornales que no son accesibles debido a vehículos aparcados u obras, se procederá a inspeccionar un número adicional superior para considerar este efecto y tener un margen de seguridad.

De este modo finalmente, se procedió al registro de alrededor de 1300 rejas en cada inspección.

La inspección visual se llevó a término en 3 etapas, fotografiando en cada una de ellas las 1300 rejas del conjunto. Dos de las inspecciones fueron efectuadas en los días sucesivos a lluvias caídas y una durante la estación seca.

- 1 Inspección : 28 de Agosto de 2013.
- 2 Inspección : 19 de Noviembre de 2013.
- 3 Inspección : 30 de Enero de 2014.

La primera inspección visual se realiza a finales del mes de agosto, con un espaciado de más de un mes (41 días) desde la última lluvia registrada, con el fin de observar si los patrones observados mostraban diferencias respecto a la época de lluvias.

En este época se da la circunstancia de que gran parte de la población se encuentra de vacaciones, situación que facilita la inspección visual al residir menor población en las ciudades y reducirse el número de coches estacionados en las aceras.

La segunda inspección visual se realizó a mediados de noviembre, después que se registraran las siguientes lluvias en los días anteriores (datos del observatorio del Raval, Barcelona):

- 16 de Noviembre de 2013 $P_{24h} = 26,6$ mm.
- 17 de Noviembre de 2013 $P_{24h} = 42,3$ mm.
- 18 de Noviembre de 2013 $P_{24h} = 40,1$ mm.

Por último, la tercera inspección visual, se realiza a finales de enero después de que se registraran los siguientes sucesos de precipitación:

- 29 de Enero de 2014 $P_{24h} = 27,0$ mm.
- 30 de Enero de 2014 $P_{24h} = 5,8$ mm.

Hay que destacar que no es de gran importancia la precipitación total caída en 24 horas (P_{24h}) sino su intensidad. Después de constatar in situ el estado de la calle tras la precipitación caída en la zona, se procedió a la inspección visual de los imbornales seleccionados.

La duración de cada una de las series realizadas posteriormente a los sucesos de lluvia, se limita a los siguientes 10 días a los días de precipitación, para reducir posibles modificaciones en los patrones de colmatación por interacción con el medio de las brigadas de limpieza de las ciudades. De esta manera, se daba poco tiempo a que estas brigadas limpiaran las calles y con ello, quitando la maleza y suciedad que se acumula entorno o sobre las rejas después de cada evento de lluvia.

Es importante comentar, que en las dos series de época húmeda, en caso de aparecer dos patrones diferentes para la misma fotografía de una reja, se seleccionó el patrón más desfavorable.

En la Figura 3.4.5 se observan las rejillas, distribuidas uniformemente en la cuenca, que conformarán el conjunto a visitar en los días posteriores a las lluvias antes nombradas. Se puede observar que estas abarcan una gran superficie de la cuenca.

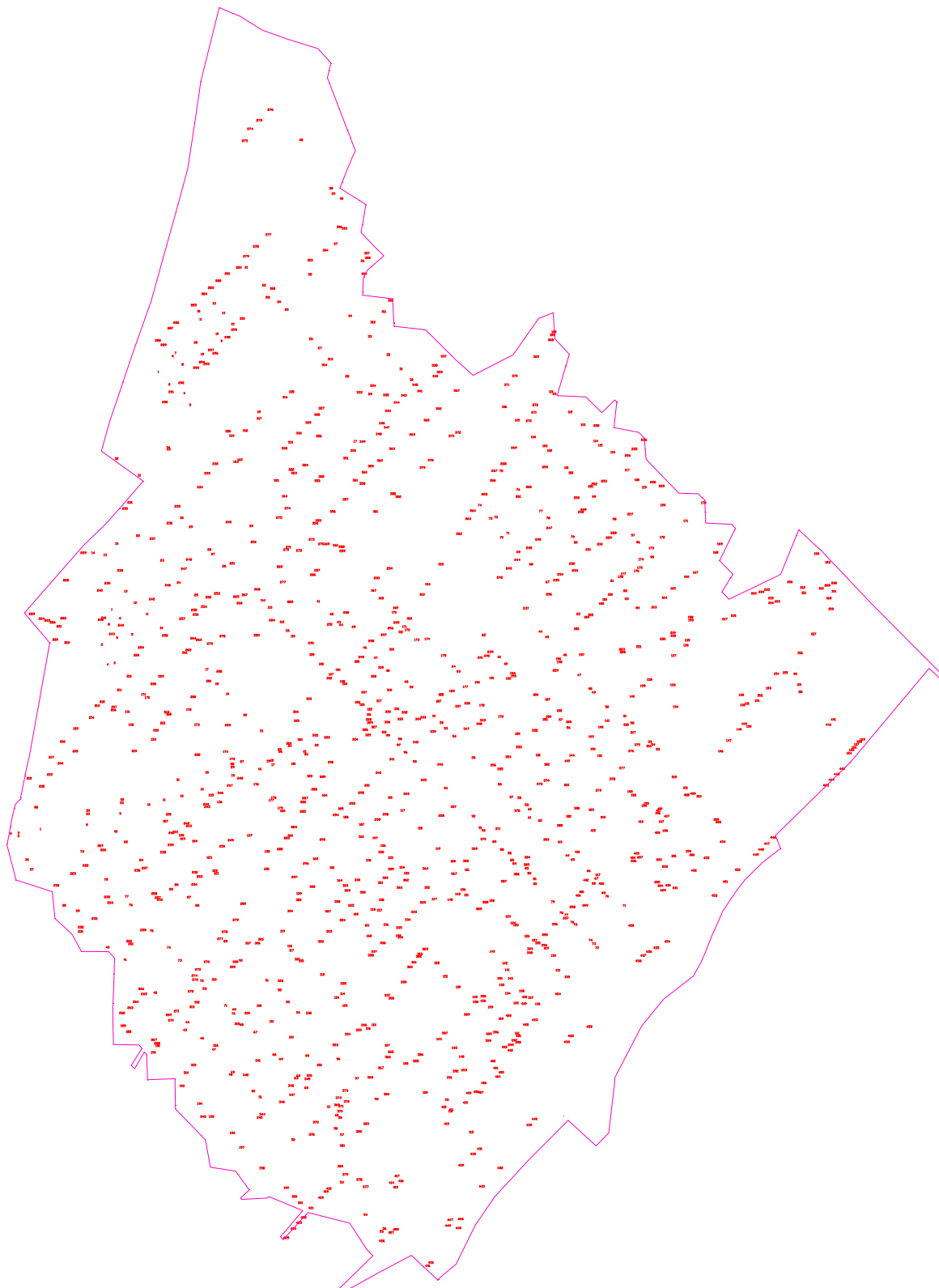


Figura 3.4.5. Plano de ubicación del conjunto de imbornales seleccionados de la Cuenca urbana de St. Martí para su inspección visual.

Una vez seleccionados los tipos de rejillas para su observación y el número de éstas que se inspeccionarán visualmente, se creará un itinerario a seguir en los distintos días. En la medida de lo posible, se iban observando las rejillas por calles, primero recorriendo las verticales y después las calles horizontales de la cuenca.

Debido a la falta de actualización del inventario en archivo AutoCAD proporcionado por CLABSA, muchas de las rejillas marcadas estaban referenciadas de forma imprecisa, no coincidía el modelo o directamente no existían. Por ese motivo las inspecciones se llevaron a cabo de forma más lenta, para subsanar esos errores y al final del estudio proporcionar a CLABSA un mapa más actualizado de la red de imbornales de la cuenca.

Para el tratamiento de datos recogidos, se creará una hoja Excel donde se entrarán los siguientes datos: Nombre de la calle, número de la rejilla, coordenadas X e Y, modelo, fotografía, estado de colmatación... etc.

Por ejemplo en la Figura 3.4.6 se puede observar uno de los itinerarios seguidos durante un día típico de inspección (16 km en 6 horas).

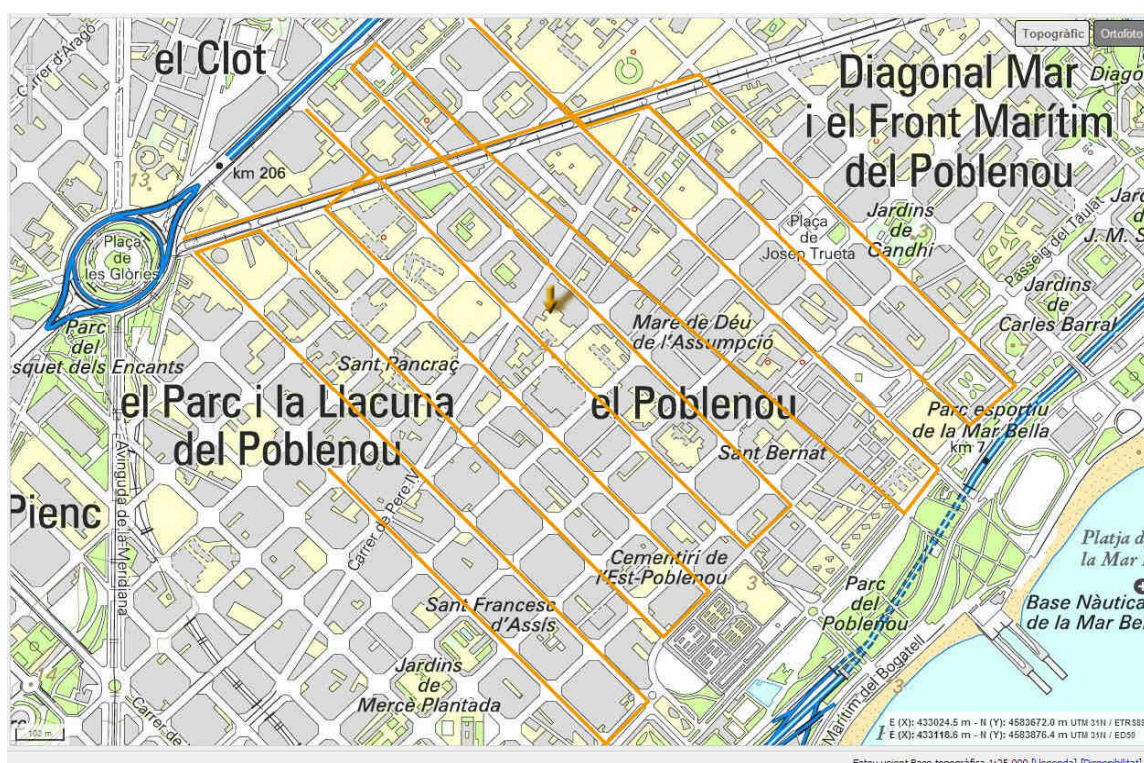


Figura 3.4.6. Mapa del itinerario seguido en un día típico de inspección de los sumideros en la cuenca de Sant Martí.

La distancia total recorrida a pie durante cada una de las etapas es del orden de 80 km, si tenemos en cuenta las 3 fases de la inspección visual, resulta en un total de 240 km recorridos.

3.5 Identificación de los patrones de colmatación

Los patrones de colmatación se dan normalmente en calles, donde la limpieza se dificulta en gran medida por la presencia casi permanente de coches estacionados en la acera, y que en algunos casos, sus ruedas descansan directamente encima de la reja, colaborando a su obstrucción. En estas rejillas, el polvo se incrusta en las barras, recubriéndolas hasta taponar los huecos.

A través de las diferentes visitas de campo se ha creado una base gráfica digital de datos con la cual se ha podido determinar los porcentajes de rejillas obstruidas dentro de la cuenca así como definir aquellos patrones más comunes. Se ha procurado separar los datos obtenidos a partir de la observación de los sumideros durante la etapa calificada como seca de aquellos obtenidos en los días posteriores a los eventos de lluvia.

De esta manera, se han podido diferenciar los patrones originados por el efecto de arrastre del agua de aquellos derivados de otros elementos.

Finalizado el análisis de los datos se ha establecido el criterio siguiente (Tabla 3.5.1) para clasificar los patrones observados en diferentes categorías, según la relación entre el área de huecos colmatada (A_c) y el área total de huecos de la reja (A_h). En caso de existir dos patrones en una misma categoría, el menos desfavorable pasa a la categoría inferior.

Criterio de Clasificación	
Ninguno	$A_c/A_h < 10\%$
Patrón C1	$10\% \leq A_c/A_h < 25\%$
Patrón C2	$25\% \leq A_c/A_h < 50\%$
Patrón C3	$50\% \leq A_c/A_h < 80\%$
Reja fuera de servicio	$A_c/A_h \geq 80\%$

Tabla 3.5.1. Criterio establecido para clasificar los patrones observados en las diferentes rejillas de la cuenca.

Los resultados de esta clasificación se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.5.2) y en las figuras de las siguientes páginas, donde podemos observar que un número importante de rejillas presentan patrones de colmatación.

Criterio de clasificación			
A_c/A_h	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
Reja nº 1: E5	-	-	-
Reja nº 2: R-121	15,00%	20,00%	-
Reja nº 3: IMPU	20,00%	35,00%	65,00%
Reja nº 4: Meridiana	-	-	-
Reja nº 5: Barcelona	-	15,00%	50,00%
Reja nº 6: Teide	30,00%	45,00%	-
Reja nº 7: Ebro	40,00%	50,00%	70,00%

Tabla 3.5.2. Resultados obtenidos para cada modelo y patrón, del cociente entre el área de huecos colmatada (A_c) y el área total de huecos de la reja (A_h).

Hay que tener en cuenta, que las rejillas que muestran un patrón de colmatación ven alterada su geometría. Éstas tienen menos área de huecos (A_h) y por lo tanto, el área mínima que engloba a los huecos también disminuye (A_g).

En la mayoría de casos, los patrones de colmatación también reducen el ancho y/o longitud efectiva de la rejilla, alterando el comportamiento hidráulico y reduciendo su eficiencia de forma notable.

Para facilitar la observación de los patrones definidos en las siguientes figuras (3.5.3, 3.5.5 y 3.5.7), se ha otorgado un fondo de color a la superficie que se encuentra colmatada modificando la geometría respecto la rejilla en un perfecto estado de conservación.

A su vez, se resume en las tablas 3.5.4, 3.5.6 y 3.5.8 los datos actualizados de la geometría de las rejillas una vez se han analizado sus patrones de colmatación. Aquellos parámetros geométricos que se vean alterados por la colmatación respecto las mismas rejillas en perfectas condiciones, se mostraran con un fondo de otro color.

En la última columna de las tablas anteriormente mencionadas, se incluye la variación porcentual del área de huecos respecto a la situación ideal. Estas cifras nos darán una idea de que rejillas se ven más perjudicadas por la colmatación, reduciéndose drásticamente su eficiencia de captación.

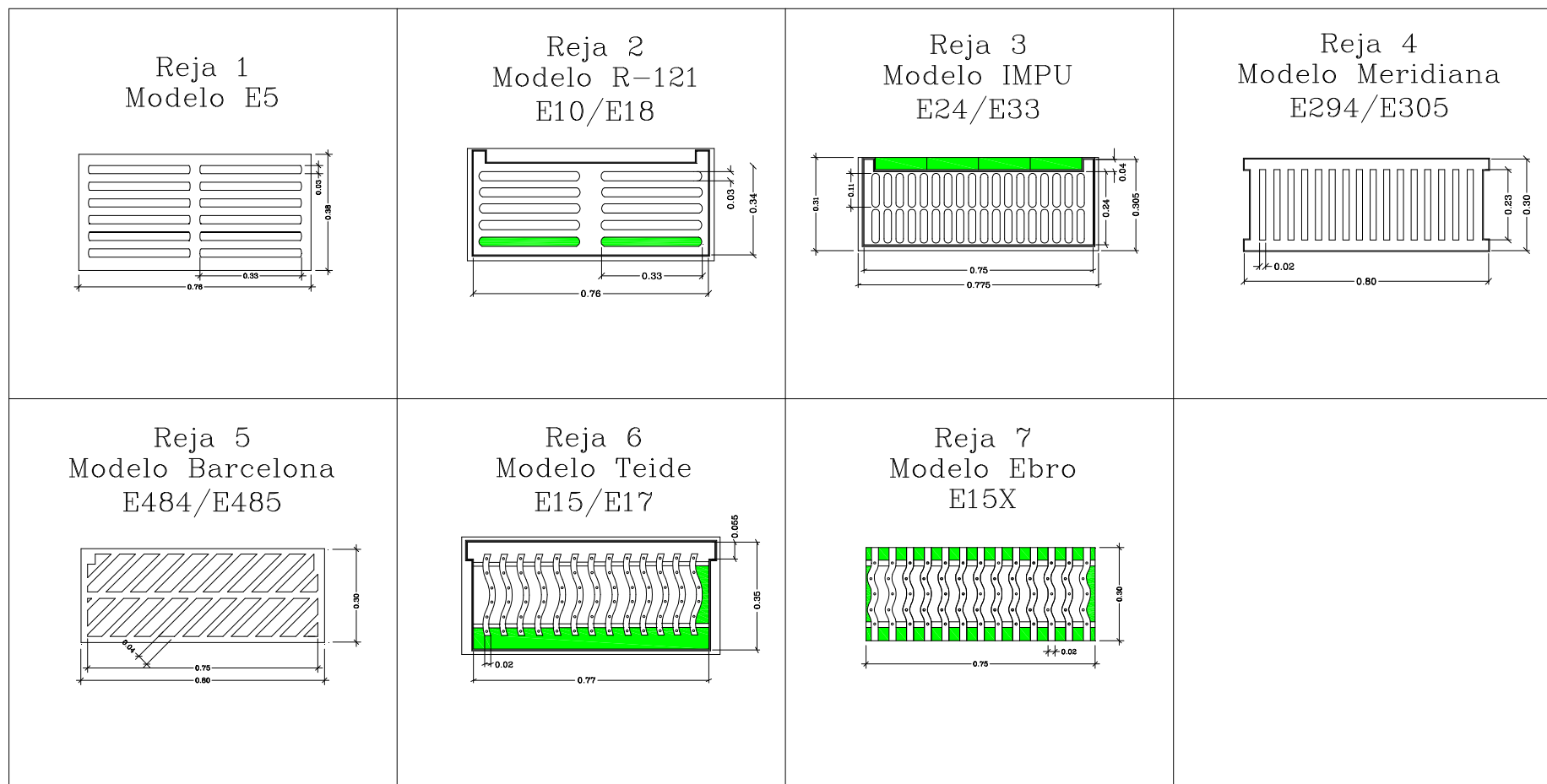


Figura 3.5.3. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.

Características geométricas de las rejillas colmatadas con patrón C1

Nº Reja	Nombre	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Nº barras longitudinales (n_l)	Nº barras diagonales (n_d)	Nº barras transversales (n_t)	Área de huecos (A_h , mm ²)	Área que engloba a los huecos (A_g , mm ²)	Porcentaje de huecos (p , en %)	Pérdida de huecos (%)
1	E5	733	344	7	0	1	106000	209000	50,72	0,00
2	R-121	752	270	5	0	1	108500	190500	56,96	15,23
3	Impu 40 R0976	775	250	1	0	17	94000	159000	59,12	22,63
4	Meridiana	721	237	0	0	15	74000	160000	46,25	0,00
5	Barcelona	772	257	1	13	0	104000	162000	64,20	0,00
6	Teide	770	290	1	0	13	135000	198000	68,18	28,38
7	Ebro	720	230	0	0	11	68500	123000	55,69	46,90

Tabla 3.5.4. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C1.

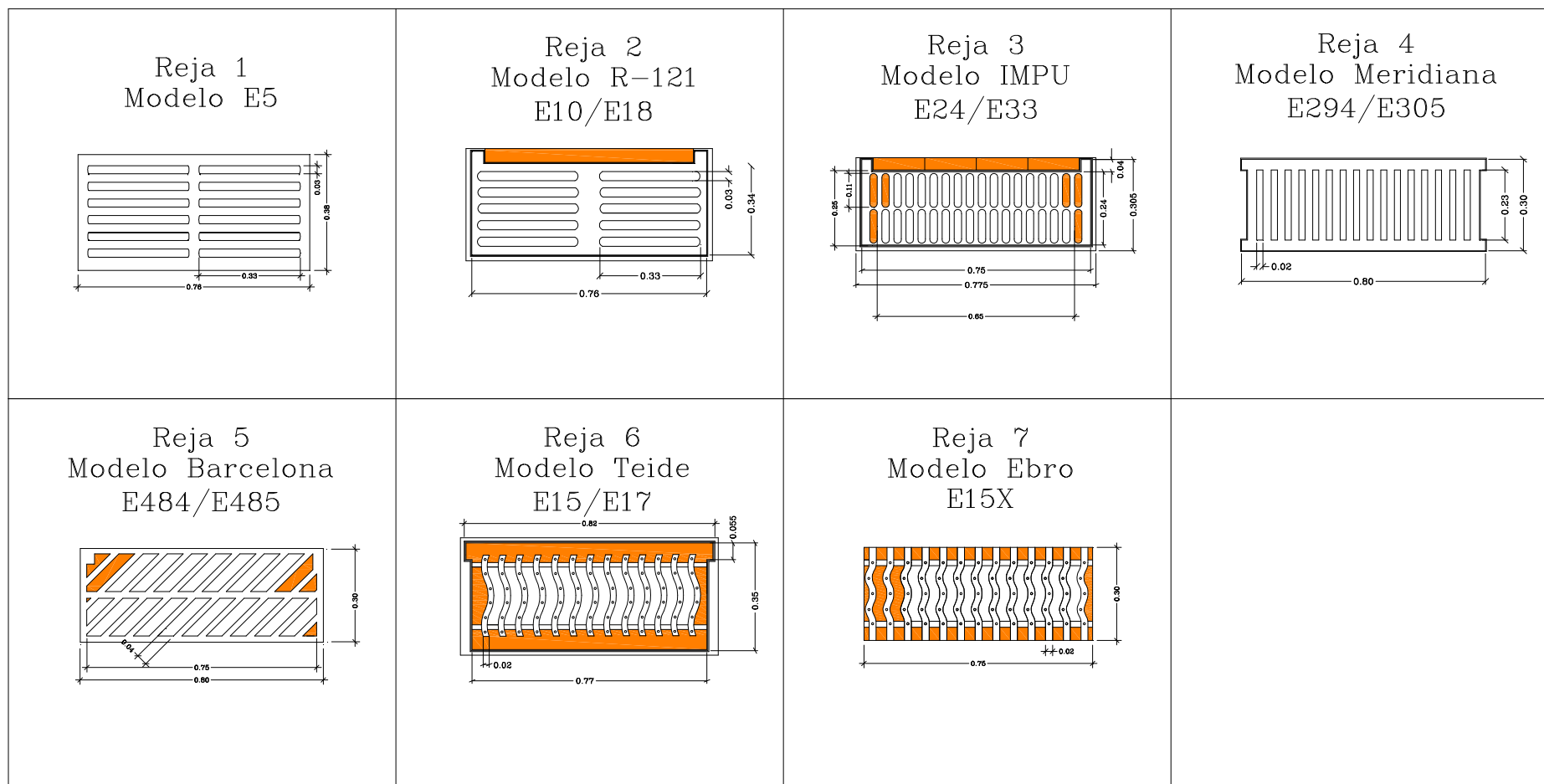


Figura 3.5.5. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.

Características geométricas de las rejillas colmatadas con patrón C2

Nº Reja	Nombre	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Nº barras longitudinales (n_l)	Nº barras diagonales (n_d)	Nº barras transversales (n_t)	Área de huecos (A_h , mm ²)	Área que engloba a los huecos (A_g , mm ²)	Porcentaje de huecos (p , en %)	Pérdida de huecos (%)
1	E5	733	344	7	0	1	106000	209000	50,72	0,00
2	R-121	752	280	6	0	1	97000	178000	54,49	24,22
3	Impu 40 R0976	660	250	1	0	15	78500	131000	59,92	35,39
4	Meridiana	721	237	0	0	15	74000	160000	46,25	0,00
5	Barcelona	772	257	1	13	0	90000	136000	66,18	13,46
6	Teide	720	270	0	0	11	84000	125000	67,20	55,44
7	Ebro	650	230	0	0	9	55500	102000	54,41	56,98

Tabla 3.5.6. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C2.

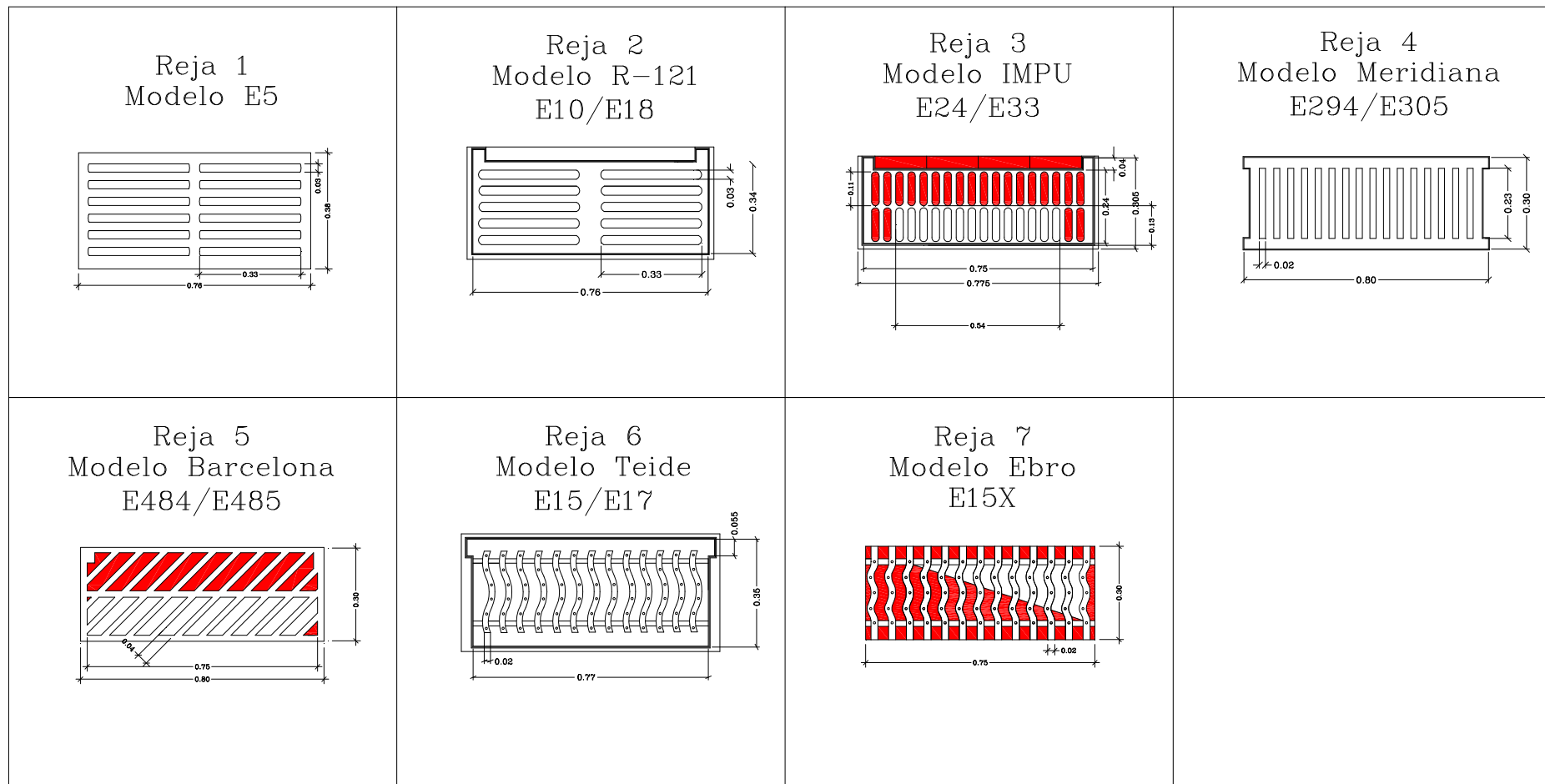


Figura 3.5.7. Esquemas de los patrones C1 de colmatación de los imbornales seleccionados.

Características geométricas de las rejillas colmatadas con patrón C3

Nº Reja	Nombre	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Nº barras longitudinales (n_l)	Nº barras diagonales (n_d)	Nº barras transversales (n_t)	Área de huecos (A_{hr} , mm ²)	Área que engloba a los huecos (A_g , mm ²)	Porcentaje de huecos (p , en %)	Pérdida de huecos (%)
1	E5	733	344	7	0	1	106000	209000	50,72	0,00
2	R-121	752	330	6	0	1	128000	231000	55,41	0,00
3	Impu 40 R0976	550	135	0	0	15	42000	60000	70,00	65,43
4	Meridiana	721	237	0	0	15	74000	160000	46,25	0,00
5	Barcelona	772	145	0	10	0	55000	80500	68,32	47,12
6	Teide	770	360	2	0	13	188500	272000	69,30	0,00
7	Ebro	620	230	0	0	9	39000	50000	78,00	69,77

Tabla 3.5.8. Características geométricas de los sumideros elegidos para inspección visual de la cuenca urbana de St. Martí con el patrón de colmatación C3.

Una vez realizada la inspección visual del estado de los sumideros, observamos que aparecen algunos patrones de colmatación en las rejillas seleccionadas, siendo más perceptibles y fácilmente identificables en ciertas rejillas como la EBRO, la TEIDE o la IMPU.

Para referirnos a estos primeros patrones de colmatación (Figura 3.5.3), se los denominará C1 teniendo en cuenta que puede existir un patrón C1 diferente para cada modelo de rejilla. Este primer patrón obstruye los espacios de menor ancho y que normalmente se sitúan en los bordes de la rejilla.

A diferencia de las rejillas 2, 3, 5, 6 y 7, las rejillas 1 y 4 no tienen ningún problema debido a colmatación y no presentan patrones característicos en ninguna situación.

De observarse las diferentes series de fotografías con una mayor atención, se puede apreciar que algunas rejillas sufren una mayor colmatación que aquella definida en el patrón C1 si no se les dedica una limpieza asidua y constante en el tiempo. Esto es debido en gran parte a la ubicación y a fenómenos aleatorios, como puede ser la proximidad de una rueda de un vehículo aparcado en el entorno de la rejilla, estando la rueda estacionada aguas abajo de la rejilla, dando paso sin obstruir al flujo del agua y facilitando la colmatación de la rejilla por los residuos al no quedar atrapados en el entorno de la rueda. Definiremos este nuevo patrón como el C2.

Las rejillas que sufren una mayor variación entre los patrones de colmatación C1 y C2 son las rejillas 3, 5, 6 y 7 (IMPU, Barcelona, Teide y Ebro). Se observa que en casi todas las rejillas este nuevo patrón de colmatación modifica al anterior, siempre aumentando la superficie colmatada tomando como punto de partida las secciones ya taponadas con suciedad y extendiéndose por los orificios contiguos a los colmatados en el patrón de colmatación C1. La rejilla Barcelona pasa de no tener ningún patrón en la primera clasificación a tener un patrón C2, colmatándose el área de huecos transversal de los dos bordes. Aunque su área de huecos colmatada es baja ($\approx 15\% A_h$) se ha decidido ponerla en esta categoría para mantener la notación con otro estudio [2].

En el caso de la rejilla número 2 R-121, hay que comentar que para la gran mayoría de casos ($\approx 90\%$) esta rejilla se encuentra colmatada con patrón C1 y C2 debido a que se ha construido o colocado de forma indebida, provocando que esta funcione incorrectamente y se colmate de forma casi directa en poco tiempo. Por este motivo no es un patrón interesante ya que no se da de forma natural por fenómenos aleatorios.

Algunas rejillas muestran una evolución de su patrón de colmatación C2, que se aprecia en la última serie de figuras (Figura 3.5.7). A estos nuevos patrones de colmatación más graves, los definiremos como C3.

Las más representativas de este fenómeno, son las rejillas Ebro, IMPU y Barcelona. Éstas sufren un avance de la colmatación, obstruyendo los orificios interiores hasta taponar casi toda la rejilla en los casos más severos. Una excepción es la rejilla Teide, que pese tener a una geometría parecida a la Ebro, su colmatación C2 no progresa en casos más graves, no pudiendo definir un patrón C3.

Todos estos patrones definidos en las figuras anteriores, se pueden observar en fotografías a pie de calle en el Anejo A: *Patrones de colmatación de los sumideros de la cuenca de Sant Martí*.

3.6 Observaciones del estudio de campo

En numerosas ocasiones las rejillas se encuentran obstruidas por las ruedas de los coches que se encuentran aparcados en la calle, impidiendo el avance de algunos residuos y a su vez, obstruyendo el curso del agua. También encontramos contenedores de basura ubicados encima de los imbornales taponándolos total o parcialmente e impidiendo su función principal.

Por ello, sería recomendable el estudio previo de los servicios que se pretenden ubicar en las calles para evitar estos hechos, pudiendo trasladar en la mayoría de los casos, las rejillas una distancia suficientemente corta para no alterar de manera importante su funcionamiento hidráulico, pero que a la vez, permita la colocación de las rejillas en zonas donde su obstrucción se dé con menor frecuencia.

Las dificultades encontradas en la realización del estudio de campo han sido diversas, se expone un resumen a continuación:

- La ciudad es un medio, que aunque sea artificial, es cambiante y ve alterada su fisonomía a menudo. Durante el estudio de campo, nos hemos encontrado con diversas zonas afectadas por obras, a excepción de las obras en la plaza Glòries y en la zona de la Sagrera, el resto de obras eran puntuales y de poca importancia. Algunas de estas obras han modificado algunos datos previos como el modelo de rejilla y su situación, sin embargo el número total de rejillas afectadas directamente por las obras es muy reducido.

También hay que tener en cuenta que estas obras, al generar algunas de ellas residuos importantes en la calle, pueden provocar colmatación en los sumideros directamente afectados y en la zona de influencia de dichas obras. Se ha estudiado este efecto y la conclusión es que los residuos de las obras colindantes no afectan al tipo de colmatación de los sumideros, en todo caso, su colmatación es más rápida al ser residuos de mayor tamaño y mayor consistencia pero siguiendo los mismos patrones establecidos anteriormente.

- Los datos proporcionados por CLABSA son imprecisos, incompletos y desfasados. Muchos de estos datos no contemplan actuaciones recientes con lo cual existe una discordancia entre los datos de muchas rejillas y la situación real a pie de calle. Es frecuente encontrar que muchos sumideros ya no existen o se encuentran desplazados de ubicación, o que el modelo del sumidero es incorrecto ya que ha sido sustituido por uno más moderno y los datos no han sido actualizados.

Sería recomendable para la planificación y diseño de la red de drenaje de las ciudades un esmerado estudio de la ubicación y modelos dispuestos en las áreas urbanas, actualizando el inventario actual de sumideros a medida que se aprueban las diferentes actuaciones.

- La inspección visual ha servido a su vez para constatar que algunas rejillas presentan cierto deterioro grave, ya sea debido al paso del tiempo o al paso de vehículos de gran tonelaje por encima. Estas rejillas deberían cambiarse de forma inmediata al ser un peligro para los peatones y ciclistas.



- También se hace patente la mala colocación de las rejjas. Se colocan las rejjas en lugares poco idóneos para la captación de agua o en sentido inverso a su posición diseñada para captar el agua, provocando su mal funcionamiento. En otros casos, la mala construcción de la caja del desagüe de las rejjas provoca que estas se colmaten más rápidamente que el resto. Se ha estudiado y contabilizado todas estas incidencias (*Apartado 4.4 Resumen de las estadísticas del estudio de campo*) con el resultado de que en el 85% de los casos, dichas rejjas se encuentran colmatadas, con lo cual



existe una relación entre la mala construcción/disposición y la colmatación de las rejjas.

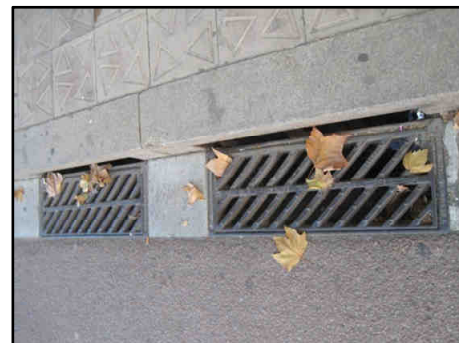
- Algunas rejjas se encuentran en zonas donde los servicios de limpieza no pueden acceder (bajo rampas de acceso a autobuses, contenedores de basura...) quedando rápidamente taponadas por residuos de tamaño grande, que fácilmente serían retirados de encontrarse las rejjas en otros lugares no muy lejanos a los actuales. También nos hemos encontrado con casos que bares y restaurantes tapan las rejjas de forma premeditada para evitar que desprendan malos olores, haciendo que estos sumideros pierdan su función de regular el caudal circulante por la calle durante un suceso de lluvia.



- En algunas zonas poco habitadas de la cuenca donde mayoritariamente hay solares vacíos o almacenes, se observa un deficiente mantenimiento de las calles. Es frecuente encontrar diversos depósitos de arena y polvo que tarde o temprano, terminan por colmatar y tapar por completo algunas rejjas. Afortunadamente, prácticamente la mayoría de la superficie de la cuenca presenta un mantenimiento suficiente para evitar que las rejjas se tapen por completo, pero no para evitar que se colmaten parcialmente.



- Finalmente, otro problema ha sido que muchos sumideros son dobles y no están marcados como tal en el mapa de CLABSA, además del hecho que poner dos sumideros de forma consecutiva no resulta muy efectivo ya que la primera reja es la encargada de absorber la mayor parte del caudal agua, quedando la otra en segundo plano. Por lo tanto en estos casos, la inspección visual solo se llevó a cabo en el primer sumidero en la dirección del agua.



Se deberían diseñar los sumideros con una distancia adecuada entre ellos para no sobrepasar un determinado caudal máximo circulante por la calle y cumplir los criterios de seguridad.

4. Resultados del Estudio de campo

Para confeccionar los resultados del estudio de campo, sólo se tuvieron en cuenta aquellas rejas que pudieron ser inspeccionadas de forma satisfactoria las 3 veces; en caso contrario los resultados fueron descartados.

De esta manera de las 1300 rejas previstas a inspeccionar en cada etapa en toda la cuenca, al final pudimos recoger los datos de 1200 rejas, lo que nos permite tener un amplio margen y superar con creces el objetivo mínimo de 15% de rejas inspeccionadas de cada modelo, con el fin de obtener unos resultados fiables y consistentes.

4.1 Patrones de colmatación

En general, todos los resultados obtenidos son coherentes respecto a otros estudios [2] que tuvieron en cuenta el proceso de colmatación, en 5 de nuestras 7 rejas de estudio (R-121, IMPU, Barcelona, Teide y EBRO) resultando en unos patrones observados similares a los que fueron definidos en este trabajo. Solamente comentaremos unos detalles a continuación.

El nuestro estudio, la reja R-121 presenta un patrón de colmatación C1 y C2, mientras que en el otro estudio no se pudo definir ninguno. Esto es debido a la problemática que hemos comentado anteriormente, ya que esta reja en nuestra cuenca se ha colocado de forma indebida numerosas veces, provocando que funcione incorrectamente y se colmate de forma casi directa en poco tiempo. Por este motivo no es un patrón interesante ya que no se da de forma natural por fenómenos aleatorios (Figura 4.1.1)

En las rejas Teide y Ebro, a pesar de tener unas características geométricas similares, los patrones C1 y C2 de ésta última ocupan una superficie colmatada mayor. El resultado se traducirá en una pérdida de eficiencia de captación aún mayor para la reja Ebro que las pérdidas de eficiencia de la reja Teide.



Figura 4.1.1. Ejemplo de una mala construcción de la reja R-121.

Resumiendo los resultados obtenidos, las rejas R-121 (reja nº2), IMPU (reja nº3), Barcelona (reja nº5), Teide (reja nº7) y Ebro (reja nº7) muestran patrones de colmatación claros, siendo los patrones de la IMPU, Teide y Ebro los más desfavorables respecto al área de huecos perdida.

En cambio, las rejas E5 (reja nº1) y Meridiana (reja nº4) no tienen ningún problema debido a colmatación y no presentan patrones característicos en ninguna situación. Para más detalles específicos e ilustraciones, consultar el apartado 3.5 *Identificación de los patrones de colmatación*.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

4.2 Frecuencias de los patrones de colmatación

Durante el mes de agosto (época seca) se realizó una inspección visual para observar si existe variación en la forma y frecuencia de los patrones de colmatación, según la estación del año en que se observen.

Recordemos que los patrones de colmatación se forman debido en gran parte a la ubicación y las condiciones aleatorias del entorno de la reja, como puede ser el viento y la proximidad de una rueda de un vehículo aparcado en el entorno de la reja. Asumimos que las fuentes de aportación de polvo y suciedad son las mismas para toda reja. Se puede complicar por efectos puntuales, obras, cercanía de parques, etc. pero aceptaremos la uniformidad en la distribución del material de colmatación. De esta manera, la misma reja, visitada en días diferentes puede presentar patrones de colmatación distintos con lo que se dificulta un recuento de éstos.

A pesar de esta dificultad, se ha procedido al recuento para cada época (seca y húmeda), modelo y patrón observado llegando a los valores mostrados en la Tabla 4.2.1.

Podemos apreciar que entre la época húmeda y la época seca, la distribución de frecuencias de los patrones de forma individual y total ($C1+C2+C3$) es muy similar y en algunos casos es la misma en las dos épocas. Solamente se puede apreciar una ligera tendencia al alza de aparición de patrones más severos en la época seca para la reja IMPU.

La conclusión es que este fenómeno se da con la misma intensidad durante todo el año y que la escorrentía provocada por las lluvias, no afectan ni al tipo de colmatación ni a su frecuencia de aparición.

Los patrones más repetidos son el C1 y C2 con frecuencias de entre el 20 y 70%, mientras que el patrón C3 queda en un segundo plano siendo mucho menos frecuente (2 - 9%). Ambos patrones C1 y C2 se dan con parecida intensidad en todas las rejass excepto para la reja Ebro, donde el patrón C1 es mucho más frecuente (75%) que el C2 (15%).

En cuanto a la frecuencia acumulada total ($C1+C2+C3$), ocurre en los siguientes porcentajes según el modelo: Ebro 95%, Teide 89 %, IMPU 60%, R-121 35%, Barcelona 10%, Meridiana 0% y E5 0%. La frecuencia acumulada no llega al 100%, la diferencia corresponde a las rejass que no sufren de ningún patrón de colmatación.

Las rejass que sufren graves problemas de colmatación son las rejass Ebro, Teide e IMPU debido a que fueron instaladas hace más tiempo (30 años) y a su diseño geométrico, más propenso a colmatarse. Las rejass con menos problemas son la reja E5, Meridiana y Barcelona, modelos que en general han sido instalados más recientemente (5-10 años) y demuestran tener unas características geométricas más favorables que dificultan más su colmatación.

Todos estos resultados son coherentes respecto a otros estudios [2] que tuvieron en cuenta el proceso de colmatación, en 5 de nuestras 7 consideradas. Las frecuencias individuales y totales para dichas rejass son similares. Dicho estudio también concluye que las rejass más perjudicadas por la colmatación son (de mayor a menor): Ebro, Teide e IMPU.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Modelo del Sumidero	Patrón C1 Época seca	Patrón C1 Época húmeda	Patrón C2 Época seca	Patrón C2 Época húmeda	Patrón C3 Época seca	Patrón C3 Época húmeda
Reja nº 1: E5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 2: R-121	18,37%	18,37%	17,35%	19,39%	0,00%	0,00%
Reja nº 3: IMPU	28,95%	22,37%	23,68%	18,42%	7,89%	9,21%
Reja nº 4: Meridiana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 5: Barcelona	0,00%	0,00%	5,84%	7,48%	2,01%	2,55%
Reja nº 6: Teide	30,91%	40,00%	52,73%	49,09%	0,00%	0,00%
Reja nº 7: Ebro	75,54%	75,54%	15,11%	17,27%	4,32%	2,16%

Modelo del Sumidero	C1+C2+C3 Época seca	C1+C2+C3 Época húmeda	Fuera de servicio Época seca	Fuera de servicio Época húmeda	Total Época seca	Total Época húmeda
Reja nº 1: E5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 2: R-121	35,72%	37,76%	5,10%	3,06%	40,82%	40,82%
Reja nº 3: IMPU	60,53%	50,00%	1,32%	1,32%	61,85%	51,32%
Reja nº 4: Meridiana	0,00%	0,00%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%
Reja nº 5: Barcelona	7,85%	10,04%	2,74%	0,73%	10,59%	10,77%
Reja nº 6: Teide	83,64%	89,09%	3,64%	0,00%	87,28%	89,09%
Reja nº 7: Ebro	94,97%	94,97%	1,44%	0,00%	96,41%	94,97%

Modelo del Sumidero	Patrón C1+C2+C3	Fuera de Servicio	Total
Reja nº 1: E5	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 2: R-121	37,76%	3,06%	40,82%
Reja nº 3: IMPU	60,53%	1,32%	61,84%
Reja nº 4: Meridiana	0,00%	1,50%	1,50%
Reja nº 5: Barcelona	10,04%	0,73%	10,76%
Reja nº 6: Teide	89,09%	0,00%	89,09%
Reja nº 7: Ebro	94,97%	1,44%	96,41%

Tabla 4.2.1. Frecuencias asociadas a cada uno de los patrones observados en el estudio de campo de la cuenca de Sant Martí.

4.3 Distribución espacial de los patrones de colmatación

Para llevar a cabo el análisis de la distribución de los patrones a lo largo de la cuenca, se fueron marcando en el plano en AutoCAD en diferentes capas, aquellas rejillas que presentaban alguno de los patrones definidos. Esto fue posible gracias a la hoja Excel que había sido desarrollada con el fin de recoger los datos de la inspección visual (Nombre de la calle, número de la reja, coordenadas X e Y, modelo, fotografía, estado de colmatación).

Los resultados de la distribución espacial de los patrones, para cada una de las 5 rejillas con problemas de colmatación en la cuenca de Sant Martí, se pueden ver en las siguientes figuras, donde el verde, azul y rojo sirven para marcar la localización de los patrones C1, C2 y C3 respectivamente, y el color negro sirve para marcar el resto de rejillas del mismo modelo que fueron inspeccionadas y no tenían patrón alguno.

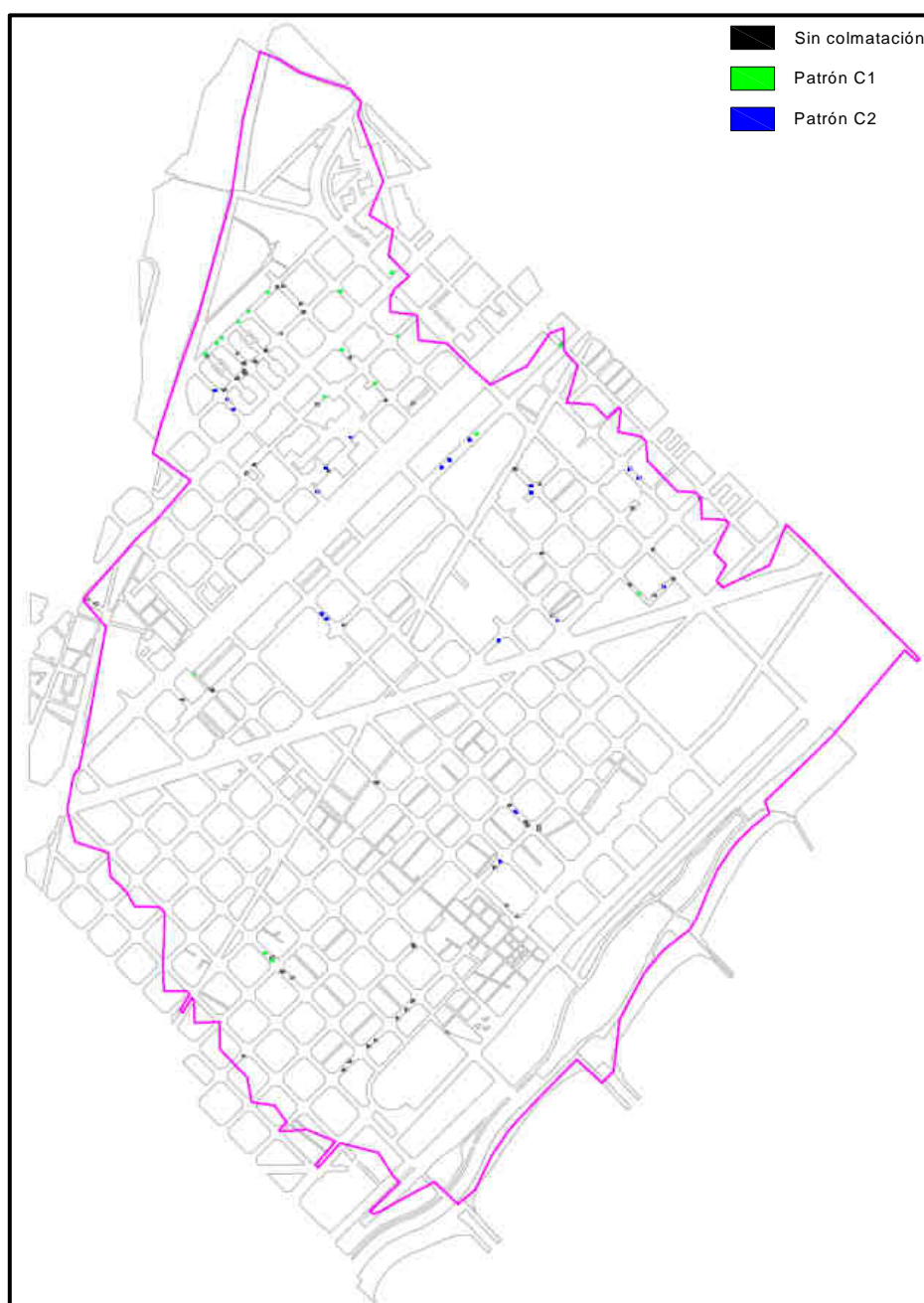


Figura 4.3.1. Distribución espacial de los patrones de la reja R-121 en la cuenca de Sant Martí.

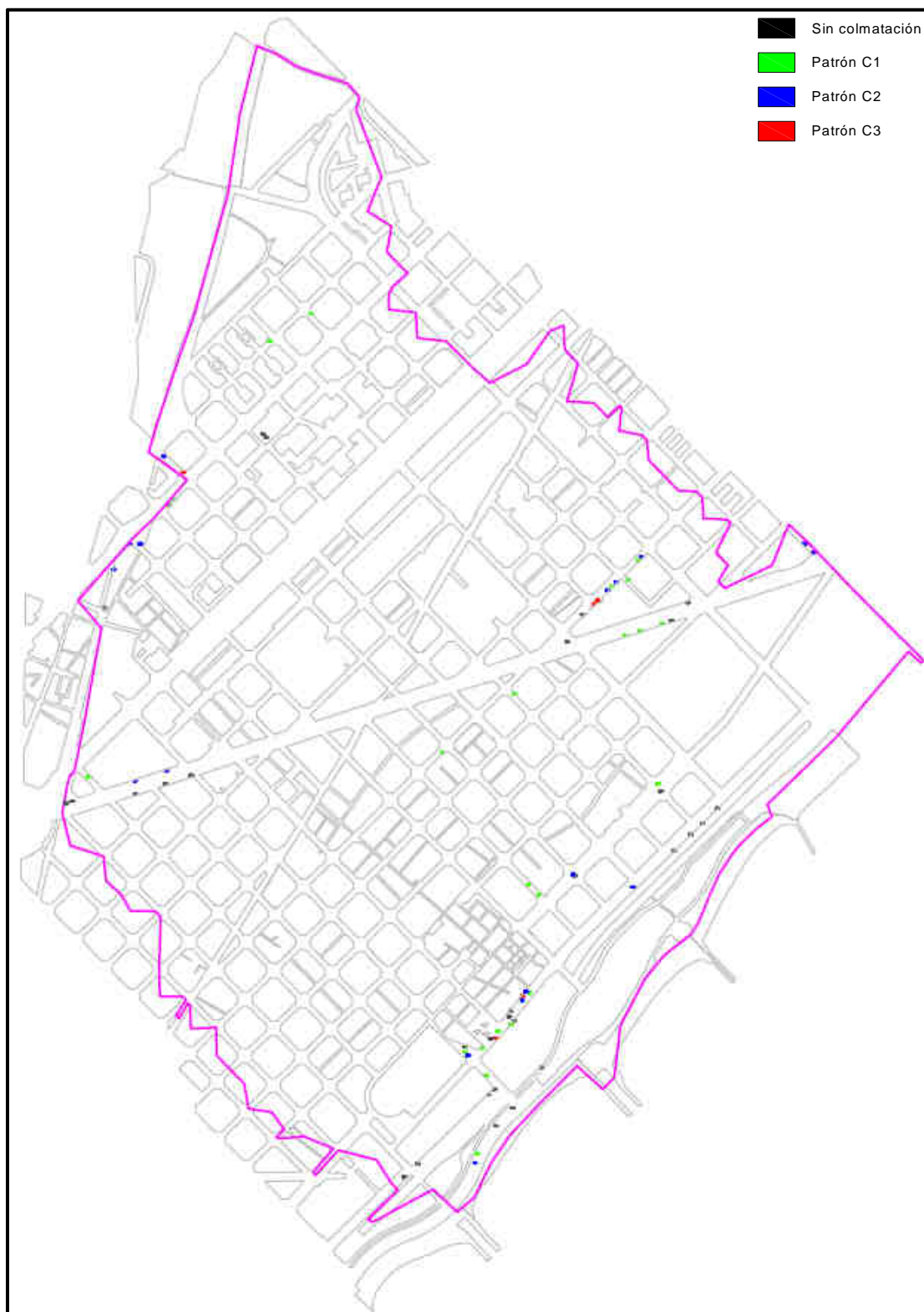


Figura 4.3.2. Distribución espacial de los patrones de la rejilla IMPU en la cuenca de Sant Martí.

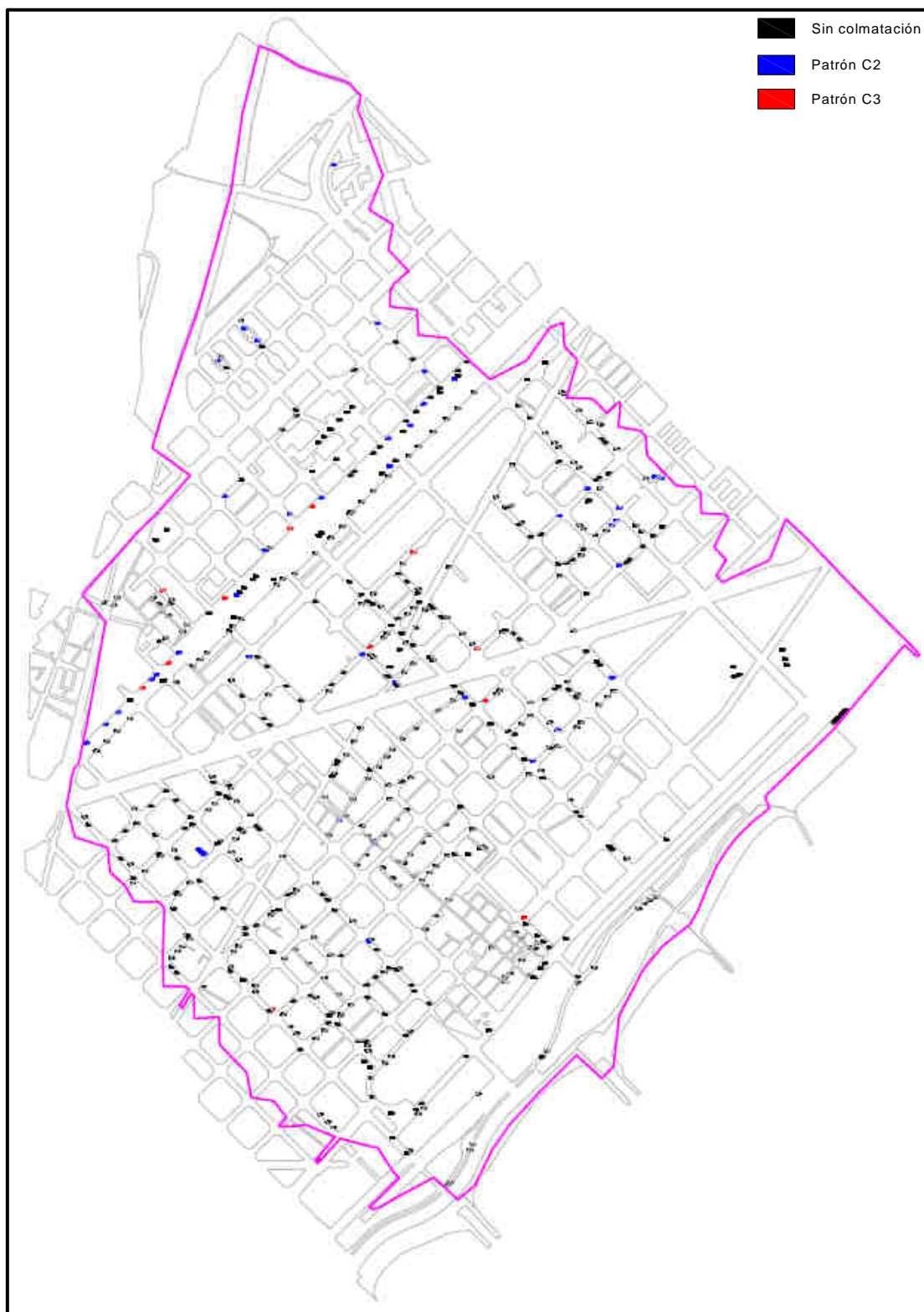


Figura 4.3.3. Distribución espacial de los patrones de la rejilla Barcelona en la cuenca de Sant Martí.

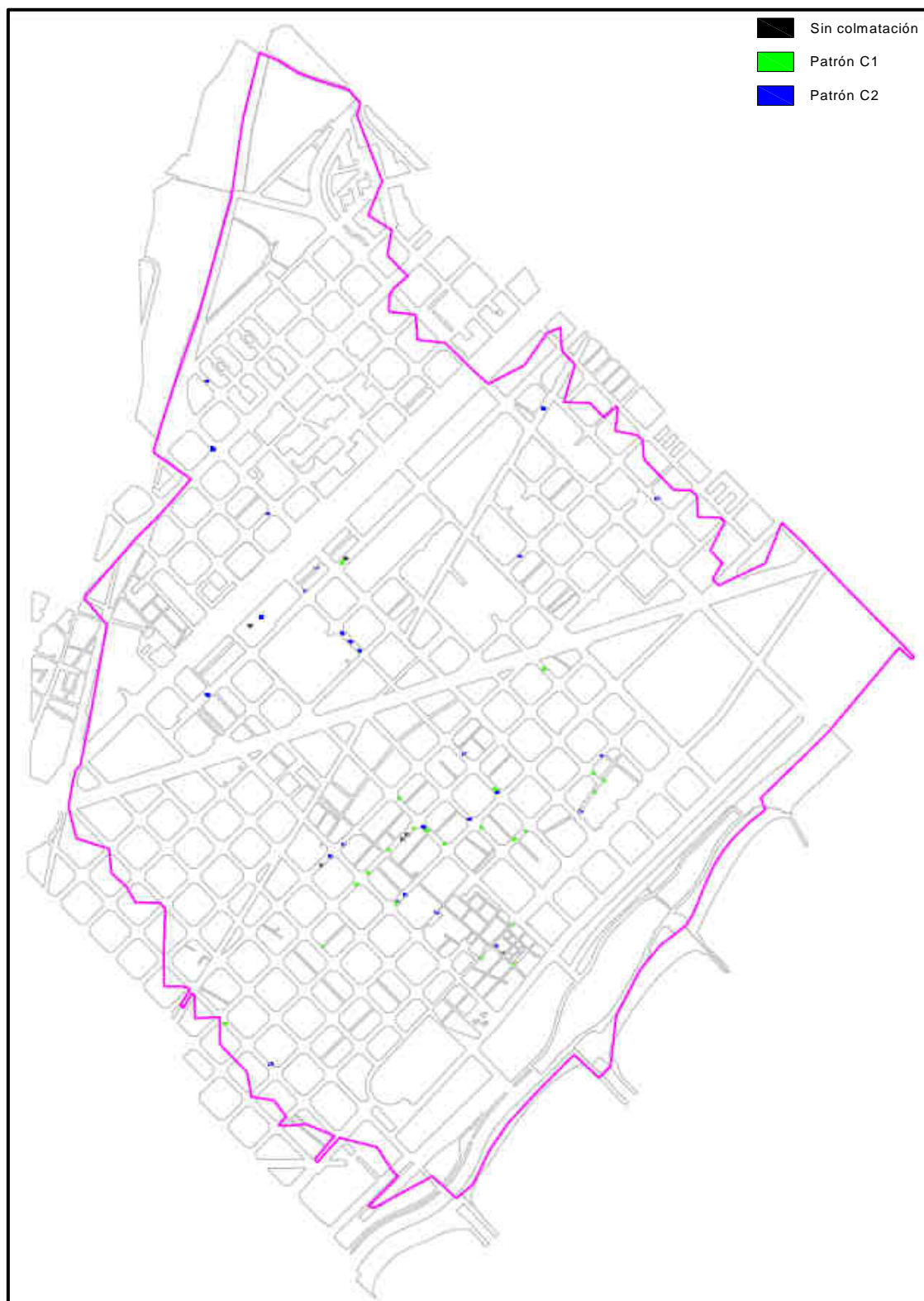


Figura 4.3.4. Distribución espacial de los patrones de la reja Teide en la cuenca de Sant Martí.

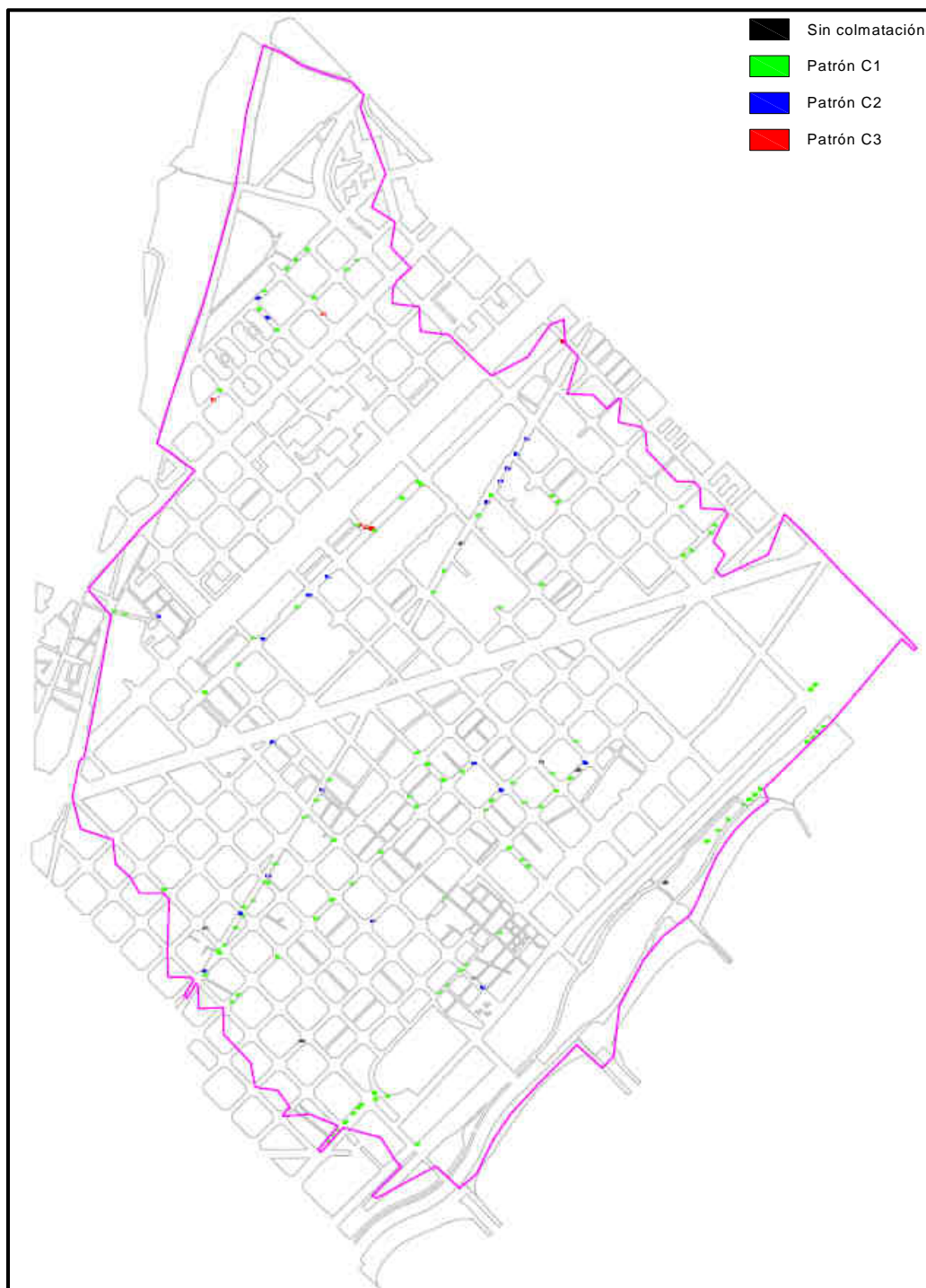


Figura 4.3.5. Distribución espacial de los patrones de la rejilla Ebro en la cuenca de Sant Martí.

A partir de observar las diferentes figuras anteriores, se ha confirmado que los patrones de colmatación se producen de manera homogénea en toda la superficie, y también repartidos indistintamente de la pendiente. Es decir, la pendiente de la calle no afecta en la distribución ni la forma del patrón de colmatación aunque si pueda afectar en la rapidez de su aparición y en el tiempo que tarde la rejilla en pasar de un patrón a otro.

Para consultar el mapa de calles en AutoCAD de la cuenca de Sant Martí y las diferentes zonas en las cuales se han detectado obras o no se ha tenido acceso, consultar el *Anejo B: Planos en AutoCAD de la cuenca de Sant Martí*.

4.4 Resumen de las estadísticas del estudio de campo (Tabla 4.4.1)

Número de rejas en la cuenca de Sant Martí	6946	
Número de rejas previstas a inspeccionar en cada etapa	1292	18,60 %
Número de rejas inspeccionadas correctamente	1187	17,09 %
Número de rejas descartadas	105	1,51 %
Rejas inspeccionadas	1187	
Rejas colmatadas en época seca	351	29,57 %
Rejas colmatadas en época húmeda	344	28,98 %
Rejas en perfectas condiciones en época seca	836	70,43 %
Rejas en perfectas condiciones en época húmeda	843	71,02 %
Rejas inspeccionadas	1187	
Rejas tipificadas incorrectamente	324	27,30 %
Rejas mal construidas y/o colocadas	159	13,40 %
Rejas dobles	102	8,59 %
Rejas afectadas por residuos de obras	11	0,93 %
Rejas que necesitan reparación urgente	3	0,25 %
Rejas mal construidas y/o colocadas	159	
Rejas colmatadas	134	84,28 %
Rejas en perfectas condiciones	25	15,72 %
Rejas descartadas	105	
Modelo desconocido	48	45,71 %
No accesibles por vehículos	23	21,90 %
No accesibles por obras	7	6,67 %
Otras causas diversas	27	25,71 %
Fotografías realizadas en la inspección visual	4325	
Etapa 1 (Agosto - Época seca)	1295	29,94 %
Etapa 2 (Noviembre - Época húmeda)	1378	31,86 %
Etapa 3 (Enero - Época húmeda)	1517	35,08 %
Inspecciones adicionales	135	3,12 %

Tabla 4.4.1. Resumen estadístico a partir de los datos recogidos en la inspección visual en la cuenca de Sant Martí.

5. Parámetros que alteran la capacidad de captación de una reja

5.1 Introducción

La capacidad de captación de una reja depende de una gran diversidad de parámetros, entre los cuales cobran especial relevancia las características de la calle (longitud, anchura, pendiente longitudinal y transversal, rugosidad...), el caudal circulante y las características geométricas de la propia reja.

Entenderemos que un caudal captado por una reja puede resultar elevado o escaso dependiendo del caudal total que circule por esa calle, por ejemplo un caudal captado de 10 l/s es mucho si el que baja por la calle es de 25 l/s, y es poco frente a 150 l/s.

Por esta razón, no nos es útil el caudal captado como dato de partida para evaluar la capacidad de captación que nos ofrece una reja, al no reflejar fielmente el comportamiento hidráulico.

A partir de este momento, denominaremos Eficiencia de captación de la reja, E , al cociente entre el caudal interceptado por la reja, Q_c , y el caudal de paso por la calle, Q . Este nuevo parámetro nos ofrece información más objetiva del rendimiento de una reja como estructura de captación frente al caudal que circula por la vía urbana.

De esta manera, definiremos Eficiencia de captación de la reja, E como:

$$E = \frac{Q_c}{Q} \quad (5.1)$$

Siendo Q_c el caudal captado por la reja al circular entorno a la superficie de influencia y Q , el caudal total que circula en el ancho de 3 metros de la plataforma.

Este factor explica mejor el rendimiento de una reja como estructura de captación frente al caudal circulante por la calle. Una reja con un 70% de eficiencia de captación presenta un gran aprovechamiento, mientras que rejillas con eficiencias menores, por ejemplo del 20%, presentan deficiencias notables como estructuras de captación.

Desde el punto de vista de diseño de la vía urbana, los parámetros hidráulicos significativos son el caudal de paso por la calle pero también el nivel de agua existente al acercarse a la reja. Ambos están relacionados a través de las condiciones de geometría de la calle y rugosidad. La expresión utilizada comúnmente para estimar el calado a partir del caudal es la de Manning pero dada la particular configuración de la vía urbana, con calados muy pequeños (del orden de centímetros) y anchos más grandes (del orden de metros), sus resultados no concuerdan demasiado bien con la realidad. Se propone la siguiente relación específica para flujo en cuneta:

$$Q = 0.38 \cdot \frac{1}{n \cdot I_x} \cdot y^{\frac{8}{3}} \cdot I_y^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

Donde Q , es el caudal de paso por la calle, I_x e I_y , son las pendientes transversales y longitudinales de la calle, y , el calado o nivel de agua en la calle y n , el coeficiente de rugosidad de Manning correspondiente al material de la calle. Como dato experimental se dispone del calado de aproximación del agua en la plataforma, aguas arriba de la reja.

Un resultado muy útil sería poder estimar la eficiencia de captación en función del calado de aproximación.

5. Parámetros que alteran la capacidad de captación de una reja

Analizadas las conclusiones que se desprenden de los estudios anteriores [2][3], para las rejillas limpias y colmatadas, se puede proponer una relación potencial entre la eficiencia de captación (E) y el cociente caudal circulante por la calle sobre calado de agua inmediatamente antes de la reja (Q/y).

La expresión es del tipo:

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (5.3)$$

Dónde:

- E: eficiencia de captación de la reja.
- Q: caudal circulante por la calle (limitado a un ancho de 3 m) o plataforma (l/s).
- y: calado de agua inmediatamente antes de la reja (mm).
- A, B: coeficientes característicos de las rejillas.

La ecuación (5.3) puede ser utilizada para otras combinaciones de caudal de paso y geometrías de la calle no analizadas en esta tesis.

5.2 Estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia

Mediante un estudio teórico, se procede a analizar de manera aproximada la variación de las diferentes eficiencias ofrecidas por las rejillas por la aparición de los patrones de colmatación encontrados durante el estudio de campo.

Para realizar el estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia, se ha tenido en cuenta el estudio más reciente sobre el tema [4], y se usarán las expresiones (5.4) y (5.5) propuestas en dicha publicación, que relacionan los diferentes parámetros geométricos de las rejillas (ver apartado 3.5 *Identificación de los Patrones de colmatación* p. 22-26) con los coeficientes A y B.

$$A = \frac{1,988 \cdot A_g^{0,403}}{p^{0,19} \cdot (n_t + 1)^{0,088} \cdot (n_l + 1)^{0,012} \cdot (n_d + 1)^{0,082}} \quad (5.4)$$

$$B = 1,346 \cdot \frac{L^{0,179}}{W^{0,394}} \quad (5.5)$$

Dónde:

- A_g : Área mínima que engloba a todos los huecos de la reja (m^2).

p: es el cociente en tanto por ciento, entre el área de huecos totales de la reja, A_H , y el valor A_g , definido como $p = (A_H/A_g) \cdot 100$
 n_t : número de barras transversales de la reja.
 n_l : número de barras longitudinales de la reja.
 n_d : número de barras diagonales de la reja.
L: longitud de la reja (cm).
W: ancho de la reja (cm).

Dichas expresiones, nos permiten aproximar los valores de A y B de forma teórica sin la necesidad de recurrir a ensayos experimentales en el laboratorio, con lo cual a partir de la expresión (5.3) podemos calcular la eficiencia respecto Q/y. De esta manera, nos será posible representar la curva de eficiencia teórica (E, Q/y), y compararla con la curva experimental (E, Q/y) obtenida a partir de los resultados medidos en el laboratorio.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesis de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[3] Martínez, Pablo. (2000), *Estudio de eficiencia de captación de rejillas y criterios de ubicación en viales urbanos*. Tesis de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[4] Gómez, M. y Russo, B. (2011), *Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets*. Institution of Civil Engineering, Water Management. Volume 164, n. 2, pp. 81-90.

5. Parámetros que alteran la capacidad de captación de una reja

5.3 Identificación de las rejillas a ser ensayadas en el laboratorio

Para centrar más el estudio, se optará por no ensayar y descartar las rejillas nº 1 y 4 al ser rejillas que no tienen problemas por colmatación, y también la rejilla nº2 al ser geométricamente parecida a la nº1.

El estudio en el laboratorio se apoyará en las rejillas nº 5 (Barcelona) y 6 (Teide), las cuales son de interés al tener un patrón de colmatación muy claro, y al existir estudios previos [5][6] con estas rejillas, que han sido ensayadas en condiciones limpias.

Las rejillas nº 3 (IMPU) y 7 (EBRO) también son de interés, ya que han sido previamente ensayadas en limpio y colmatadas en estudios recientes [2], y por este motivo, sus resultados se mostrarán juntamente con las rejillas nº 5 y 6 a modo de comparación.

Para ello nos valdremos de una hoja Excel, que nos calculará los parámetros A y B de cada uno de los patrones de las rejillas consideradas (nº 3, 5, 6 y 7), a partir de las características geométricas detalladas en el apartado 3.5 *Identificación de los Patrones de colmatación* p. 22-26, y las fórmulas (5.4) y (5.5).

A modo de comparación en la Tabla 5.2.1, se incluyen los valores obtenidos en cada caso, así como los parámetros experimentales disponibles de las rejillas 3, 6 y 7 (Consultar el *Anejo C: Valores teóricos de los parámetros A y B*, para revisar la información del resto de rejillas).

Se han marcado para su rápida observación en verde, aquellos patrones de colmatación más interesantes, para efectuar un estudio más exhaustivo de la variación de su eficiencia de captación, a través de ensayos en el laboratorio.

Reja nº 3 - IMPU	Limpia	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
A	0,363	0,336	0,313	0,224
A _{experimental}	0,386	0,255	0,233	0,152
B	0,779	0,825	0,802	0,989
B _{experimental}	0,873	0,827	0,847	0,911
Reja nº 5 - BARCELONA	Limpia	-	Patrón C2	Patrón C3
A	0,348	-	0,327	0,265
A _{experimental}	0,355	-	-	-
B	0,815	-	0,815	1,022
B _{experimental}	0,85	-	-	-
Reja nº 6 - TEIDE	Limpia	Patrón C1	Patrón C2	-
A	0,411	0,365	0,311	-
A _{experimental}	0,425	-	-	-
B	0,714	0,777	0,790	-
B _{experimental}	0,714	-	-	-
Reja nº 7 - EBRO	Limpia	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
A	0,403	0,320	0,303	0,212
A _{experimental}	0,428	0,255	0,229	0,15
B	0,763	0,841	0,826	0,819
B _{experimental}	0,797	0,832	0,829	0,803

Tabla 5.3.1. Parámetros A, B para cada patrón de colmatación de las rejillas.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[5] Mur Abad, María José. (2002), *Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja/imbornal*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[6] Gómez, M. y Russo, B. (2006), *Análisis de la capacidad hidráulica de la reja Barcelona del grupo Norinco*. (Estudio realizado a petición de la Fundación Agbar). Grup de Recerca FLUMEN, Departament de Ingenieria Hidràulica, Marítima y Ambiental de ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

6. Ensayos en el laboratorio

Se propone estudiar a escala real la captación de caudal por parte de la reja objeto de estudio. Para ello, a partir de un caudal de aproximación por la calle conocido, se medirá el caudal interceptado por la reja. De esa manera obtendremos la capacidad de captación de la reja para un caudal de paso dado y unas pendientes transversal y longitudinal dadas en la calle. El hecho de realizar el ensayo a escala real permitirá aplicar los resultados sin los problemas derivados de ensayar a escalas distintas a la 1:1.

6.1 Descripción de la instalación experimental

Para que los resultados de los ensayos reflejen con la mayor precisión y fidelidad el comportamiento del flujo en la calle, en el Laboratorio de Hidráulica de la ETSECCPB se dispone de las instalaciones necesarias para poder realizar los ensayos a la escala real (1:1) tal y como se puede observar en la Figura 6.1.1.

Las instalaciones del laboratorio del Instituto de Investigación FLUMEN, de la ETSECCPB tienen en su haber una plataforma metálica elevada en la que se ubica el imbornal que se pretende ensayar. Ésta dispone de unas dimensiones de 5,5 m de largo por 4 m de ancho, que nos permite obtener una superficie de ensayo útil de 5,5 x 3 m reproduciendo la geometría de un carril de circulación de una vía en entorno urbano.

En función de los tres puntos donde se apoya la plataforma, se puede dar cierta pendiente a la superficie en ambas direcciones, tanto longitudinalmente siguiendo el sentido del flujo como transversalmente a él.

El agua necesaria para llevar a cabo los diferentes ensayos se obtiene a través de la red de suministro fija existente dentro del propio Laboratorio.



Figura 6.1.1. Plataforma de ensayo para las rejás.

6.1.1 Instalaciones fijas del laboratorio

Las instalaciones utilizadas disponen de un grupo de bombeo que impulsa un caudal de hasta 250 l/s desde un depósito subterráneo del edificio D1 hasta otro situado en la azotea del mismo. La oscilación que puede adquirir el nivel de agua dentro del depósito enterrado aconseja limitar el caudal máximo hasta un valor de 200 l/s y de esta manera, asegurar que el aire no circula por el circuito, permitiendo realizar una medición del caudal real más fiable. El segundo depósito, situado a unos 15 metros de altura sobre el nivel de la zona de ensayo, está conectado con la tubería que suministra el agua hasta el laboratorio. El cometido del depósito de la azotea es el de mantener una carga constante y servir de elemento de regulación del caudal suministrado al laboratorio.

El sistema de válvulas permite regular el caudal de entrada a cada modelo de estudio en el laboratorio. Dispone de 2 válvulas de regulación, la primera es un Bypass de mariposa y la segunda, una de compuerta motorizada de tipo multichorro, que regulan el caudal de suministro. La válvula es controlada manualmente. La medida de caudal se realiza con un medidor de caudal electromagnético Fischer & Porter, cuya precisión se estima en 1 l/s. Gracias a esta instalación podemos fijar el caudal de ensayo a voluntad y de manera sencilla y fiable.

6.1.2 Instalación de ensayo de los imbornales

La plataforma se sirve del agua que le llega a través de una arqueta situada en la cabecera de ésta. Esta arqueta es la encargada de serenar y proporcionar una horizontalidad a la lámina de agua respecto al terreno por donde circula. De este modo se favorece que el agua cumpla la condición de movimiento unidimensional en lámina libre: en una sección (perpendicular a la dirección del flujo) la cota del agua es la misma para todo el ancho. De esta manera se consigue que el flujo alcance con mayor facilidad las condiciones de aproximación a la reja de estudio en régimen permanente y uniforme. Se pretende así reproducir lo más fielmente posible la llegada del agua en la plataforma de ensayo con una distribución transversal de calados muy parecida a la que se produce en una calle estándar de la ciudad de Barcelona, ciudad que acoge la cuenca de Sant Martí.

El depósito de cabecera tiene una anchura que nos permite abarcar todo el ancho útil de la plataforma (3,85 m) mientras que su altura es de unos 2 m y con ello, nos es posible que el agua asuma suficiente altura sobre la plataforma. Su anchura nos asegura un volumen de almacenamiento y regulación suficiente para tranquilizar el flujo de entrada.

El depósito y la plataforma se unen mediante una junta elástica en caucho butílico que permite los movimientos de la plataforma (móvil) respecto al depósito (que es fijo) y que garantiza la impermeabilidad, impidiendo que se escape el agua.

La plataforma tiene una superficie total de 3'85x5'50 m². El área útil por donde circula el agua es de 3'00x5'50 m y el flujo es encauzado por dos paredes de PVC de unos 30 cm de altura. La máxima altura de agua durante los ensayos será de 15 cm, equivalente a la altura del bordillo tipo existente en las calles de Barcelona.

La plataforma se apoya en tres puntos: las dos esquinas cercanas al depósito de cabecera y un punto hacia el otro extremo aguas debajo de la misma. El primer apoyo está formado por una rótula sobre una columna de 1'80 m que permite giros pero no desplazamientos, por lo que es un punto fijo de la plataforma. Está situado en la esquina aguas arriba en la margen izquierda según el sentido del flujo. El segundo apoyo está situado en la esquina derecha del extremo aguas arriba en sentido del flujo. Está formado por una rótula apoyada en una barra roscada que se sostiene en una columna de 1'65 m. Un volante en la barra roscada permite variar el desplazamiento vertical de dicho punto de apoyo. Se consigue así variar la pendiente transversal de la plataforma hasta un valor máximo del 4%.

El tercer apoyo permite giros y desplazamientos vertical y horizontal. Está provisto de un motor de corriente alterna que permite a través de su cuadro de mandos, modificar de manera fácil la pendiente longitudinal. El valor máximo admitido es de 10 %.

El agua captada por la reja ensayada cae a una arqueta construida en obra de fábrica, en donde se amortigua la caída del agua y se dirige hacia el vertedero de forma triangular donde se afora el caudal mediante la medida de la altura de lámina de agua con ayuda de un limnómetro que proporciona una precisión en la lectura de una décima de milímetro.

6.2 Condiciones de ensayo

Las condiciones de los ensayos se ajustan al patrón propuesto por el Laboratorio de Hidráulica de la ETSECCPB, patrón ya seguido en anteriores ensayos similares.

6.2.1 Rango de caudales de ensayo

El estudio de la capacidad de captación se realiza para 5 caudales: 25, 50, 100, 150 y 200 l/s. Estos valores serán orientativos, pudiendo estar los valores empleados cercanos pero no siendo exactamente los mismos. El límite superior viene impuesto por la capacidad de bombeo de la instalación.

El valor de 50 l/s se considera un límite inferior como resultado de los ensayos previos de análisis del comportamiento de la primera reja que se muestran como, dadas las dimensiones de la plataforma, menores caudales producían una lámina de agua del orden de tan solo milímetros, por lo que la fiabilidad de los resultados se resiente. De todos modos se incluyen resultados para 25 l/s. El rango de caudales estudiados es muy superior a los estudios de referencia encontrados, y próximo a los caudales reales que nos encontramos en un vial urbano con problemas de capacidad.



Figura 6.2.1.1. Imbornal TEIDE en la plataforma, antes y durante el ensayo.

6.2.2 Rango de pendientes de ensayo

Con objetivo de definir los valores de pendientes a ensayar, se fijaron las siguientes pendientes de ensayo:

- Sentido longitudinal (l_y): 0, 0'5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10.
- Sentido transversal (l_x): 0, 1, 2, 3 y 4.

En la serie de ensayos se imita el flujo en una calle, representada mediante una pendiente longitudinal l_y , y con una sección transversal triangular mojada dotada de pendiente transversal l_x . Se designa Q al caudal de paso por la plataforma, midiéndose el calado de aproximación (calado que se alcanza junto en el borde lateral de la plataforma, justo aguas arriba del imbornal) y el caudal captado Q_c para una serie de valores de pendientes y caudales.

Según los estudios realizados hasta el día de hoy y de manera independiente de la reja en que se haya centrado el estudio, podemos decir que la pendiente de la calle y el caudal circulante influyen en líneas generales, de la siguiente manera:

- Para caudales bajos (25 y 50 l/s) las eficiencias de captación resultan ser bastante mayores que la de los caudales altos (150 y 200 l/s).
- En general se puede afirmar que a medida que aumenta el caudal de paso, el rango de variación de eficiencias según los valores de pendiente transversal o longitudinal se reduce, o lo que es lo mismo, la eficiencia resulta ser más independiente de las pendientes de la calle en caudales altos que en los bajos.
- Existe una relación muy marcada en caudales bajos, aunque no tanto para caudales altos donde la pendiente transversal tiene menos influencia, que nos dice que a mayor pendiente transversal, mayor eficiencia.
- En el intervalo del 0 al 2% de la pendiente longitudinal (o del 0 al 4%, en función de la pendiente transversal de la calle) se observa una influencia en la pendiente longitudinal, produciéndose una disminución significativa de la eficiencia de captación, y a veces, unos saltos de eficiencia extraños atribuibles a las condiciones de confinamiento del flujo por las dos paredes laterales de la plataforma de ensayo. A partir del 6% el valor de la eficiencia se mantiene prácticamente constante, valor límite que denominaremos eficiencia residual.

Estos son los patrones de comportamiento general de una reja cualquiera en función del caudal circulante y de las características geométricas de la calle aunque, hay que recordar que la eficiencia de una reja depende también en gran medida de su geometría, ya sea la original o su geometría modificada por un patrón de colmatación.

Además, en varios estudios realizados en los últimos años, ha cobrado especial importancia la influencia en la capacidad de captación que ejercen ciertas características geométricas de las rejas como pueden ser el área de huecos, el área total que engloba a los huecos, el porcentaje de huecos respecto al área que los engloba, el número de barras del imbornal y el sentido en que estas están dispuestas (longitudinal, transversal o diagonal), la longitud y la anchura total de la reja.

En la tesina de María José Mur Abad [5] se demostró hasta qué punto la forma en la que está distribuida el área de huecos puede llegar a influir en la capacidad de captación, así como el efecto que el ancho y el largo del sumidero pueden tener sobre la eficiencia de captación.

[5] Mur Abad, María José. (2002), *Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja/imbornal*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

7. Análisis de los resultados

7.1 Introducción

Debido a la dificultad de plasmar un entorno ideal en la construcción de la superficie de la plataforma y a algunas imperfecciones e irregularidades, su superficie no es completamente lisa. Esta eventualidad puede producir alguna alteración en el curso del agua que nos cause la aparición de pequeños remolinos, resaltos locales y un patrón de captación no unidimensional frente a los unidimensionales de los demás casos. Por ello, es probable que los valores obtenidos para la pendiente longitudinal del 0%, 0,5% y 1% no sean tan fiables como los demás al producirse los efectos no deseados antes comentados.

Durante los ensayos de las rejillas nº5 (Barcelona) y nº6 (Teide), para todas las combinaciones posibles de pendientes longitudinales y transversales, se miden y anotan los diferentes valores del calado de aproximación (calado que se alcanza en el borde lateral de la plataforma, justo aguas arriba del imbornal) y el caudal se afora con la ayuda de un limnómetro, midiendo la altura de la lámina de agua antes de un vertedero triangular.

En total para cada patrón de colmatación, hay que medir el calado y el caudal captado para 5 pendientes transversales, 8 pendientes longitudinales, 5 caudales de aproximación y todas las combinaciones, lo que hace un total de 200 medidas de calado y 200 medidas de caudal por cada patrón de colmatación a ensayar. Se estima que el tiempo para realizar cada ensayo en el laboratorio, es de unas 20 h.

Una vez tenemos todos los valores, como conocemos el caudal circulante (Q) por la plataforma y el caudal captado por la rejilla (Q_c), a partir de la expresión (6.1) podemos calcular la eficiencia (E). Como conocemos también el calado (y), es inmediato calcular la relación Q/y para cada caso.

7.2 Reja modelo TEIDE: Patrón de colmatación C1

El primer patrón de colmatación que se ensaya en las instalaciones del laboratorio es el denominado C1, perteneciente al modelo de reja TEIDE. Este patrón de colmatación se consigue taponando los orificios pintados en la Figura 7.2.1 con yeso.

La reja modelo TEIDE con el patrón de colmatación C1 se observa en la siguiente figura:

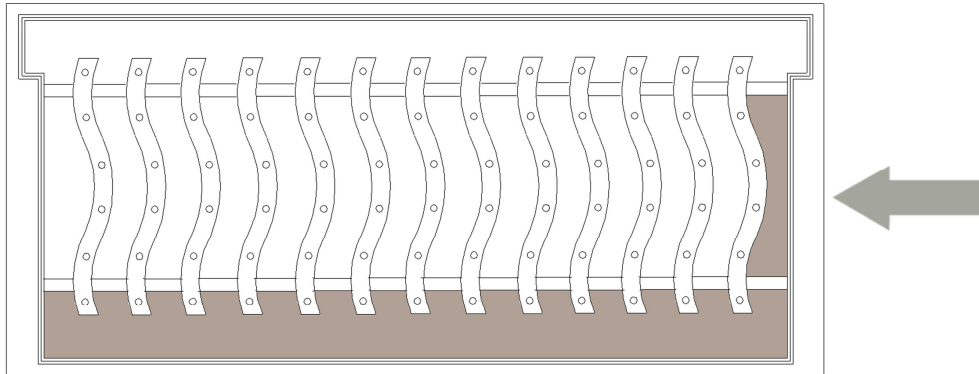


Figura 7.2.1. Sumidero TEIDE con el patrón C1 y dirección del flujo de agua.

A continuación, para ilustrar los resultados que se comentan, incluiremos aquellas gráficas pertinentes y que puedan aportar información visual para no dar información redundante. La totalidad de tablas y gráficas se encuentran en el *Anejo C Resultados experimentales de la reja Teide con patrón de colmatación C1 y C2*, y el *Anejo D Gráficas de los resultados experimentales de la reja Teide con patrón de colmatación C1 y C2*.

Si analizamos los datos obtenidos de las eficiencias según su caudal, podemos apreciar en la Figura 7.2.2 que a medida que aumentamos el caudal, la eficiencia de la reja disminuye drásticamente, pasando de valores máximos de hasta el 67 % de eficiencia para $Q = 25$ l/s, hasta valores de 13 - 14 % de eficiencia en las mismas condiciones de calado para $Q = 200$ l/s.

No se ha tenido acceso a los datos E - Calado de la reja TEIDE en limpio, si los comparásemos con los valores de la Figura 7.2.2, se apreciaría que todas las pendientes son menores que las mismas en limpio. Esto es coherente ya que la reja colmatada tiene menos capacidad de captación, resultando en una eficiencia y pendiente menor.

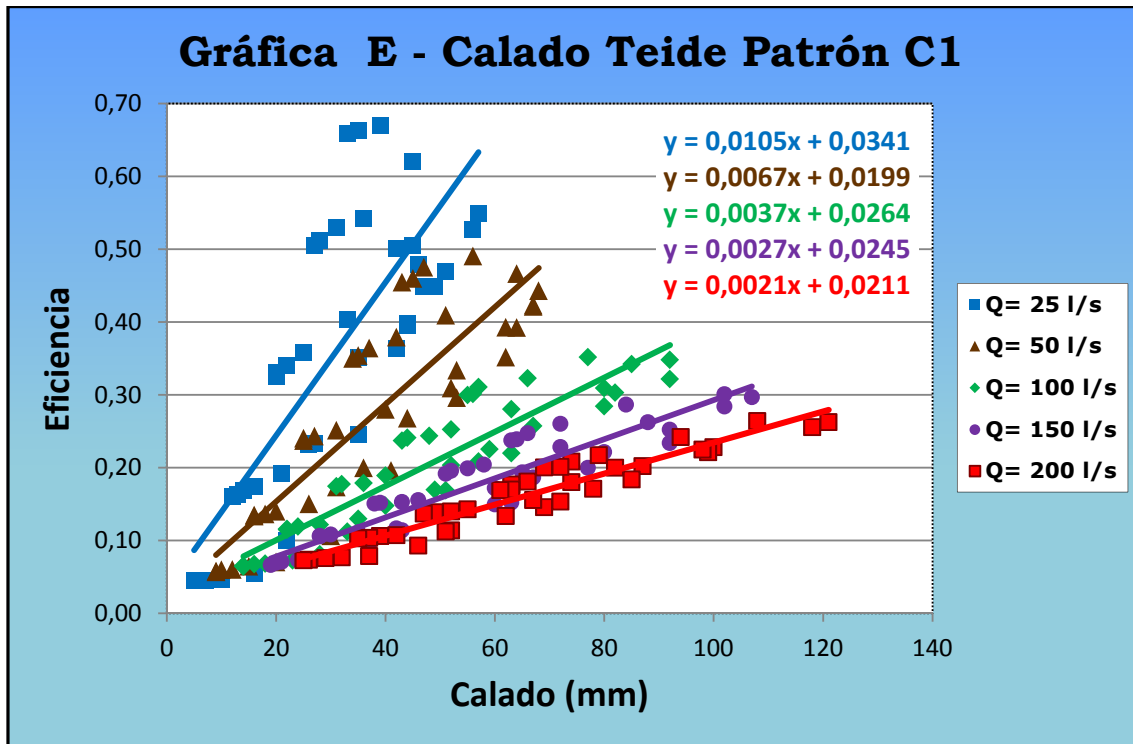


Figura 7.2.2. Gráfica E – Calado para la reja Teide con el patrón de colmatación C1.

Si analizamos los resultados de las eficiencias de captación, con el patrón de colmatación C1 según la pendiente longitudinal, existe otro tipo de comportamiento. En general la eficiencia baja progresivamente al aumentar la pendiente longitudinal de la plataforma en todos los caudales estudiados.

Para pendientes elevadas, la disminución de la eficiencia de captación es mucho menos importante y casi podríamos decir que su valor se mantiene constante. Los resultados experimentales hacen que a veces de manera puntual suba un poco, pero la tendencia general es la descrita. Esta eficiencia que podríamos denominar como eficiencia límite o eficiencia residual se aprecia de forma especialmente clara para las pendientes transversales del 0 al 2%. Hay que notar que en estas condiciones el flujo está confinado por las dos paredes laterales.

Representando la pérdida de eficiencia respecto a la pendiente longitudinal, veremos que este crecimiento de las pérdidas en la mayoría de los caudales estudiados se produce siguiendo trayectorias paralelas entre las pendientes transversales (Figura 7.2.3).

Respecto el análisis según la pendiente transversal, se puede afirmar que a medida que aumenta el caudal de paso, el rango de variación de eficiencias según los valores de pendiente transversal se reduce; en otras palabras, la influencia de la pendiente transversal se aprecia sobre todo para caudales menores.

Para un caudal de 50 l/s y para un 10% de pendiente longitudinal, la eficiencia de captación es de un 45% para una pendiente transversal del 4%, y tan solo del 6 % para una pendiente transversal del 0%. Estos mismos datos para un caudal de 200 l/s serían 20% y 7% de eficiencia respectivamente.

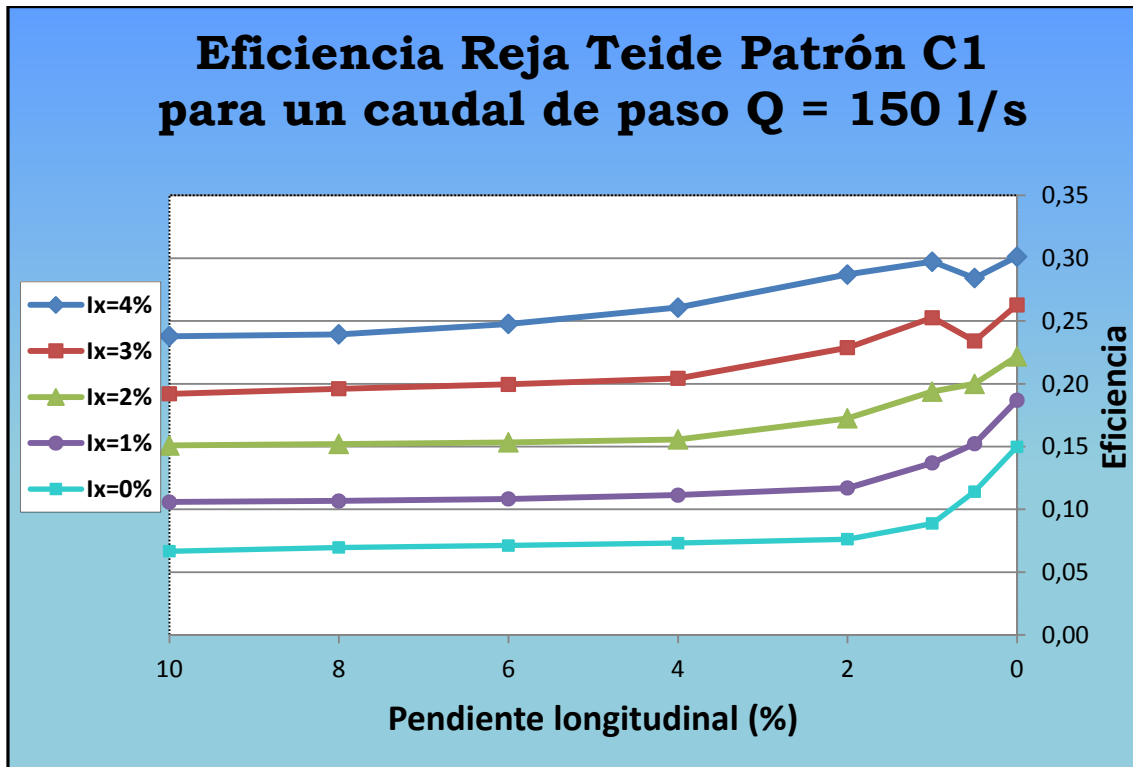


Figura 7.2.3. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 para un caudal de 150 l/s.

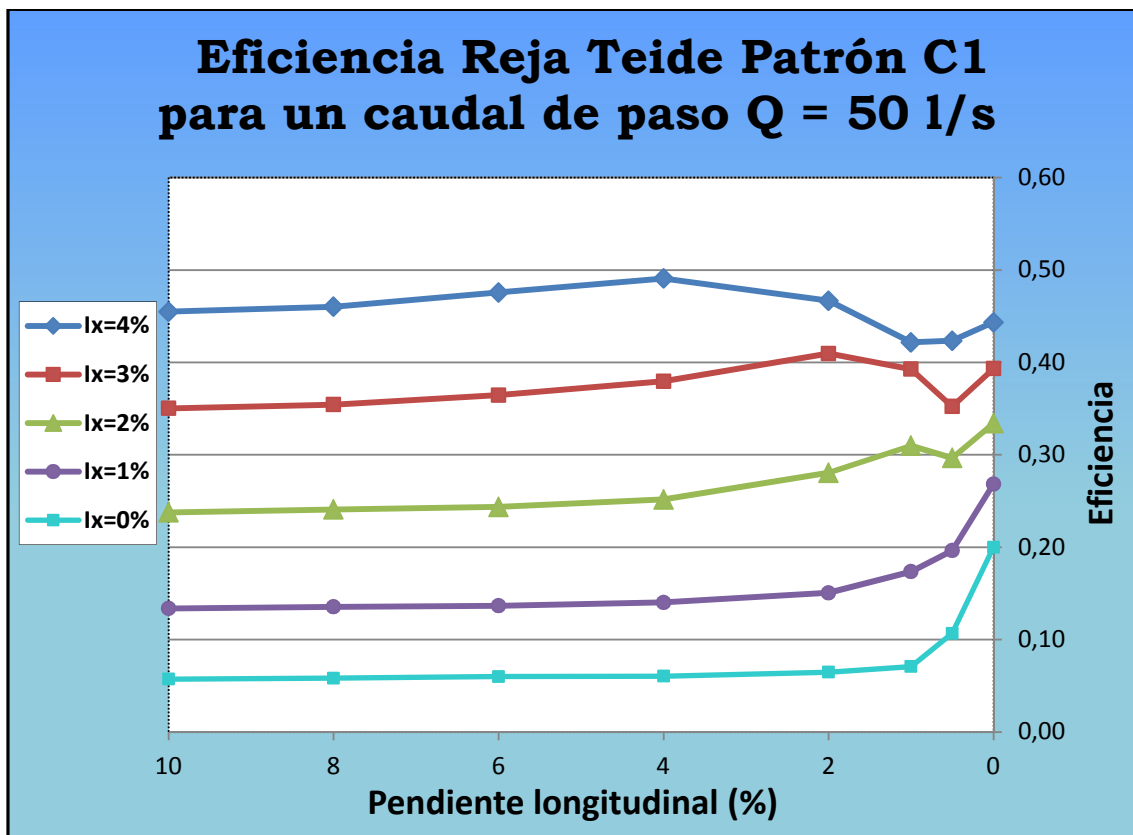


Figura 7.2.4. Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 para un caudal de 50 l/s.

Si representamos de manera tridimensional colocando en los ejes X e Y las pendientes longitudinales y transversales, y en el eje Z la eficiencia medida, obtendremos un mapa de las eficiencias para cada posible geometría, para un caudal de paso.

Esto es posible observarlo en la Figura 7.2.5, donde las eficiencias mayores reciben un color más claro que las menores, las cuales pueden causar problemas de inundación de darse en calles donde las rejillas dispuestas se encuentran colmatadas siguiendo el patrón de colmatación C1.

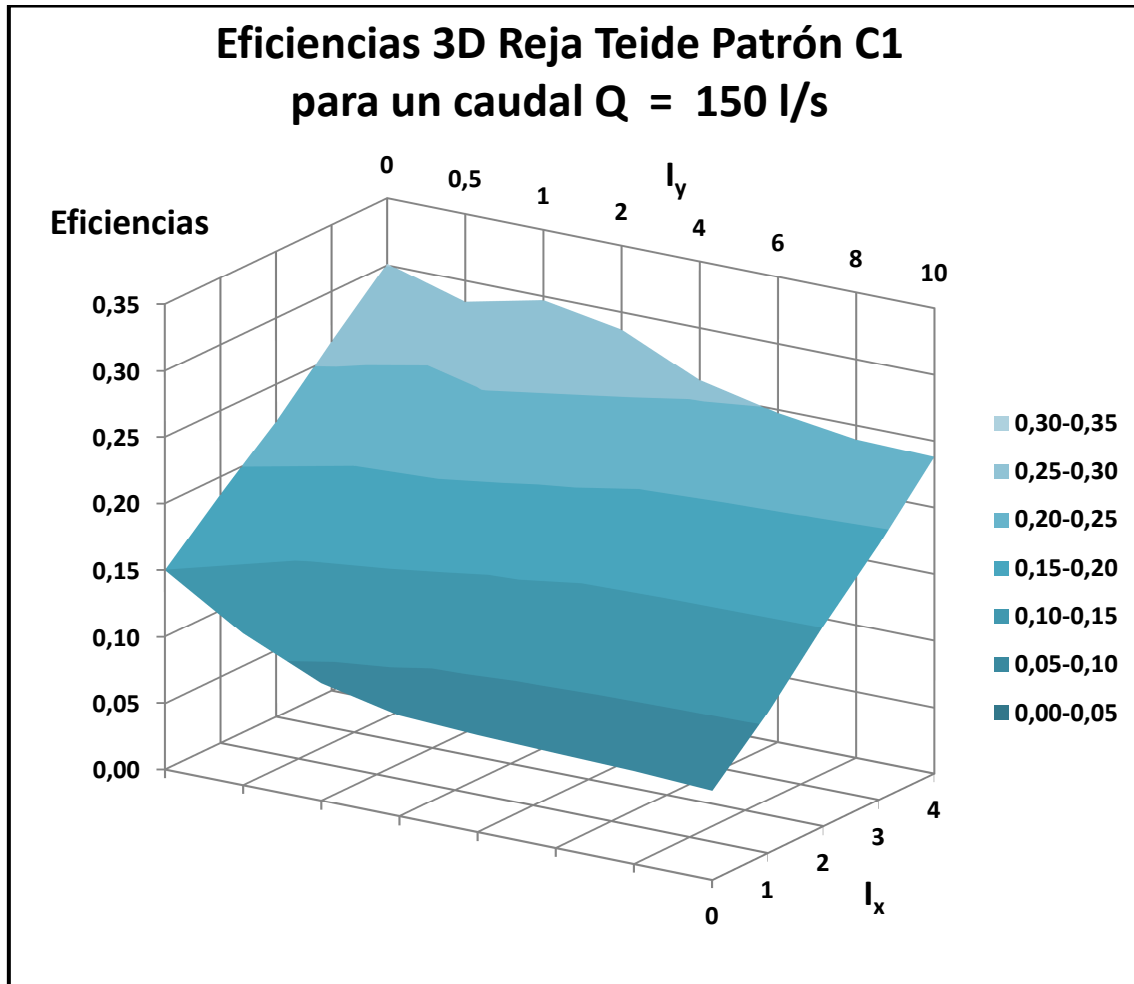


Figura 7.2.5. Eficiencias registradas en la reja TEIDE con el patrón de colmatación C1, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (I_x) y longitudinal (I_y).

Recordemos que las rejillas se disponen en la calle según su eficiencia, calculando la distancia entre éstas mediante el método de transformación de lluvia-escorrentía aplicándose el modelo de la Onda Cinemática junto a los criterios de peligrosidad, para prevenir riesgos y daños. Estos criterios que debe decidir cada población, podrían ser por ejemplo:

- Velocidad del agua (v) $< 1.5 \text{ m/s}$
- Calado alcanzado por la lámina de agua (y) $< 6 \text{ cm}$
- $v \cdot y < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$

Analizadas las conclusiones que se desprenden de los estudios anteriores [2] [3], para las rejillas limpias y colmatadas, se puede proponer una relación potencial entre la eficiencia de captación (E) y el cociente caudal circulante por la calle sobre calado inmediatamente antes de la rejilla (Q/y).

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (7.1)$$

Procuraremos realizar el ajuste anteriormente comentado para los resultados cedidos y los obtenidos en los ensayos en el laboratorio, relacionando la eficiencia con el cociente entre el caudal y el calado (Q/y).

Se observa en los datos medidos y cedidos, que para caudales bajos aumenta la dispersión de los resultados. Esto es debido a que cuando circula una lámina de agua de unos pocos milímetros, por una plataforma que no es perfectamente lisa, se producen efectos no deseados como vórtices y resaltos locales que afectan a la fiabilidad de los resultados.

Una vez situados todos los datos experimentales del ensayo de la rejilla Teide C1 en una misma gráfica Excel, se realiza el ajuste potencial para obtener la curva de eficiencia de captación (E, Q/y) y los parámetros A y B. Estos resultados se detallan en la Tabla 7.2.6 y 7.2.7, y en la Figura 7.2.8.

Reja nº 6 TEIDE	Reja Limpia	Patrón C1	Variación (%)
A_{experimental}	0,425	0,340	- 25,00 %
B_{experimental}	0,714	0,800	+ 12,05 %
A_{teórica}	0,411	0,365	- 12,60 %
B_{teórica}	0,714	0,777	+ 8,82 %

Tabla 7.2.6. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto la rejilla limpia ideal.

Reja nº 6 TEIDE	$\frac{A_{experimental}}{A_{teórica}}$	$\frac{B_{experimental}}{B_{teórica}}$
Reja Limpia	1,034	1,000
Patrón C1	0,932	1,030

Tabla 7.2.7. Variación de los Parámetros A y B, entre la aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.

Cuando una rejilla sufre algún tipo de colmatación, generalmente el parámetro A disminuye de forma importante, en cambio el parámetro B, tiene tendencia a mantenerse constante o aumentar levemente. Solamente en algunos casos con rejillas gravemente colmatadas (patrón tipo C3), se observa que el valor de B aumenta de forma significativa, pero su variación en valor absoluto respecto al parámetro original, siempre es menor que la que sufre el parámetro A.

La variación de los coeficientes entre la rejilla limpia y el patrón C1 patente en la tabla anterior, también se aprecia en la Figura 7.2.8, donde podemos observar cómo los resultados del ensayo para la rejilla Teide con patrón C1 se agrupan alrededor a un nuevo ajuste potencial, teniendo esta curva de eficiencia (E, Q/y) una trayectoria más baja respecto la curva de eficiencia (E, Q/y) para la misma rejilla en estado limpio.

Este resultado es coherente, ya que un estado de colmatación siempre provoca una pérdida de eficiencia de captación sobre la rejilla.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[3] Martínez, Pablo. (2000), *Estudio de eficiencia de captación de rejillas y criterios de ubicación en viales urbanos*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

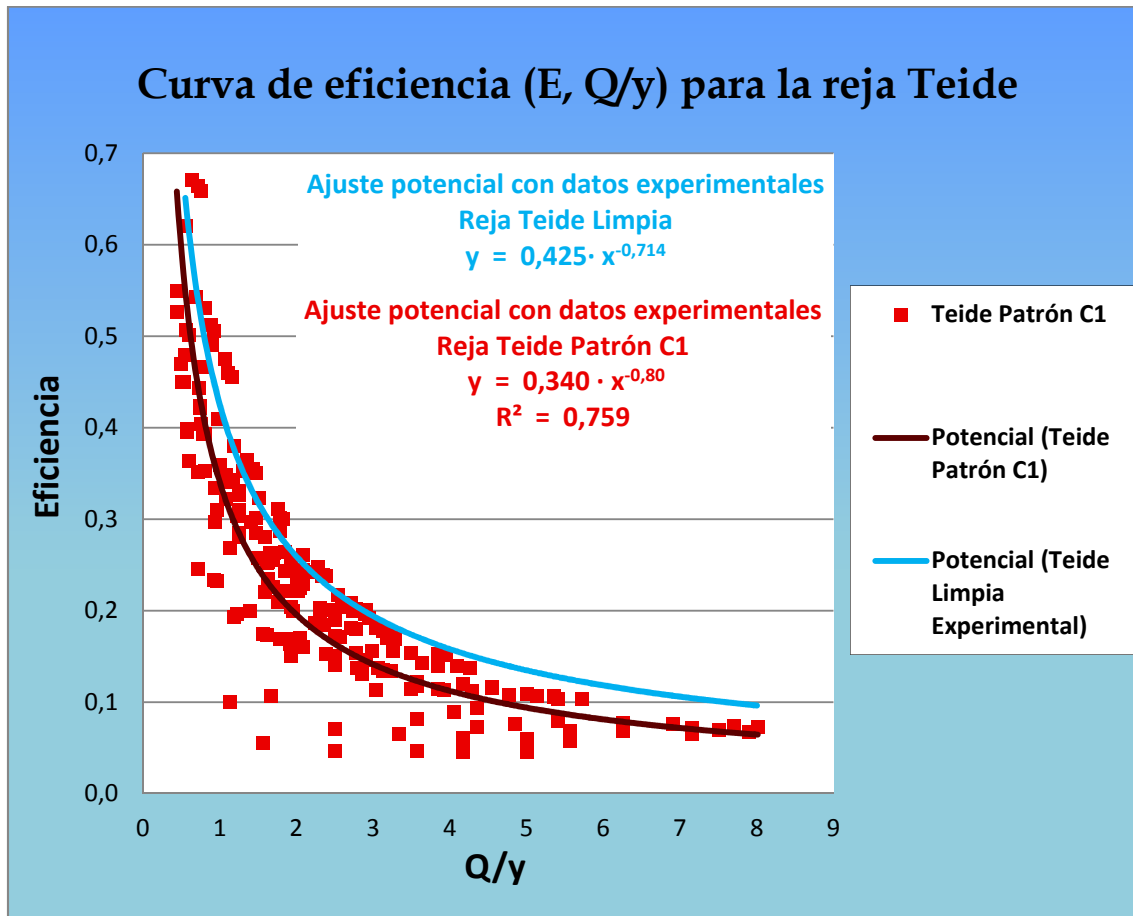


Figura 7.2.8. Curva de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatada con el patrón C1.

De la buena relación que se pueda establecer entre estos dos ajustes depende en gran medida el coeficiente de seguridad, que se otorgará a la ecuación (7.1) en el siguiente capítulo, como medida para prever las posibles variaciones introducidas por la colmatación de la reja.

A continuación, a partir de la formulación descrita en el apartado 5.2 (*Estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia*) y el ajuste potencial descrito anteriormente, podemos definir la curva de eficiencia (E, Q/y) de la reja Teide, a partir de los A y B aproximados de forma teórica.

Esto nos permite aproximar de forma teórica el comportamiento hidráulico de las rejás y compararlo con el experimental (Figuras 7.2.9 y 7.2.10).

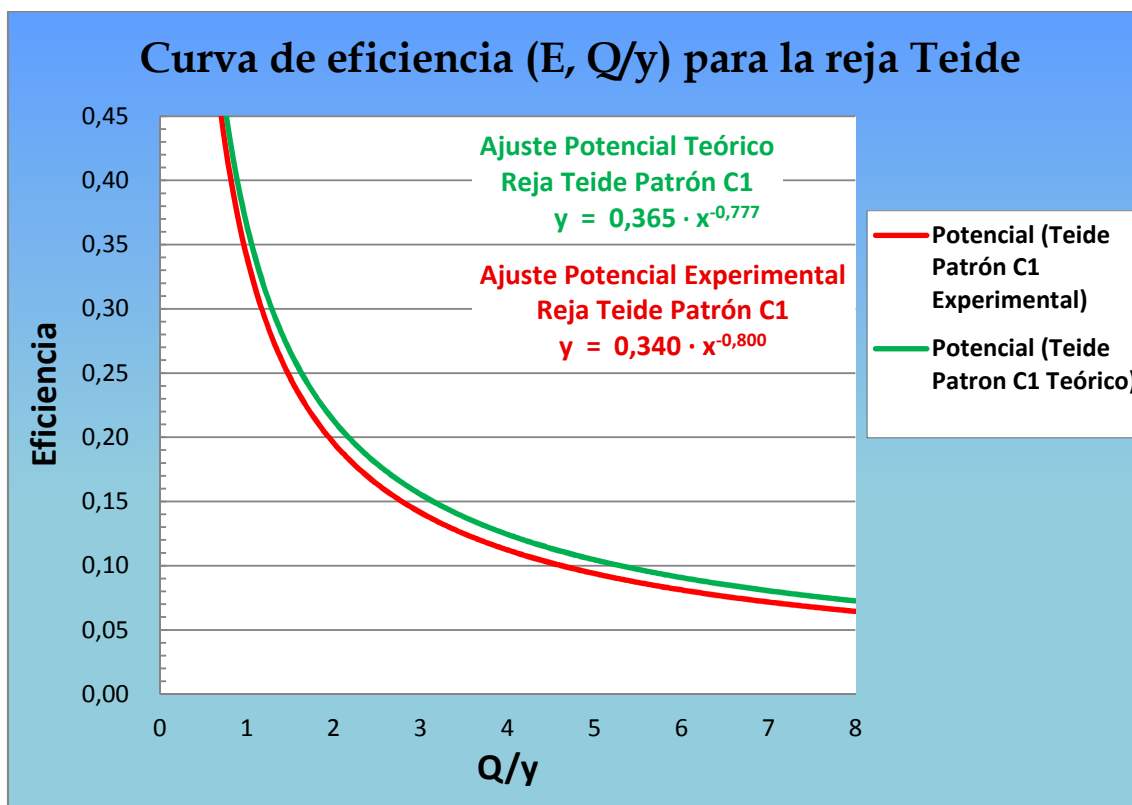


Figura 7.2.9. Curva de eficiencia para la reja Teide colmatada con el patrón C1.

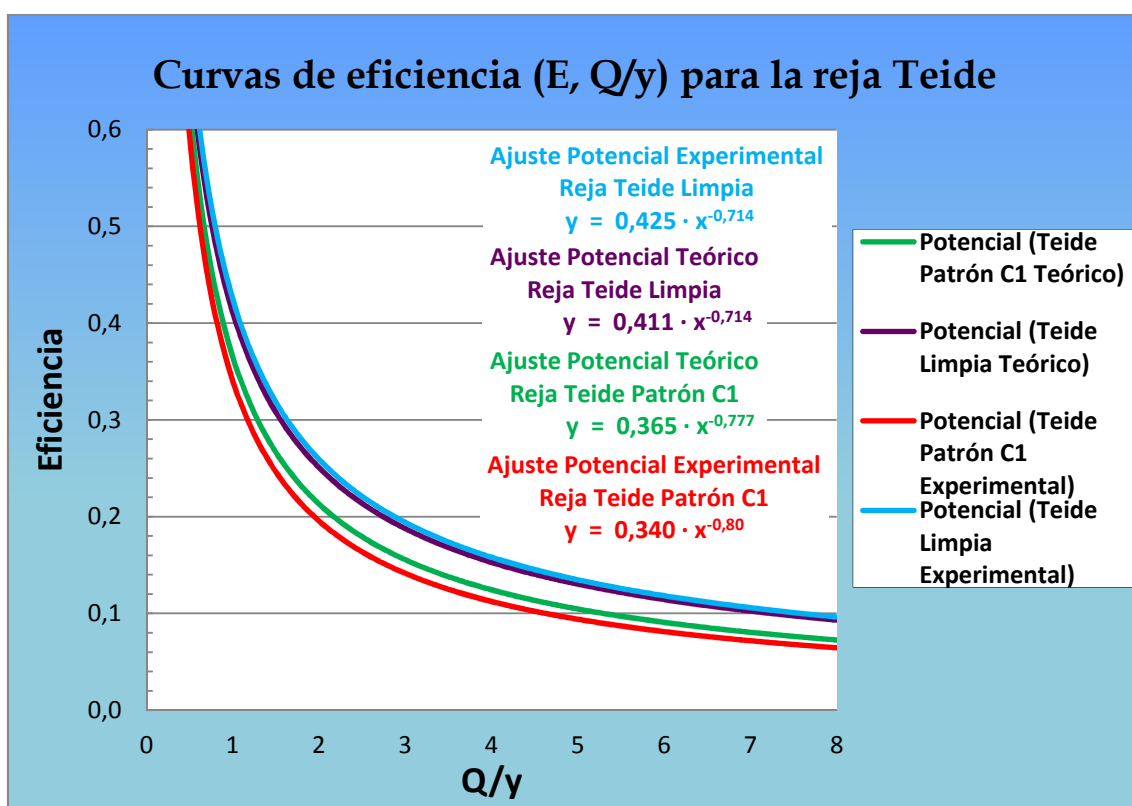


Figura 7.2.10. Resumen curvas de eficiencia para la reja Teide limpia y colmatada con el patrón C1.

Se puede apreciar el buen ajuste entre los datos teóricos y los datos experimentales en las figuras anteriores. Ambas formulaciones, la experimental y la teórica, dan unos resultados muy parecidos. Las curvas de eficiencia de captación (E , Q/y) para la reja Teide C1 son casi paralelas, con una diferencia menor al 2%. Estos resultados eran de esperar dada la similitud de los parámetros A y B según la Tabla 7.2.7.

Adicionalmente, en la Figura 7.2.10 también se ha añadido el ajuste teórico potencial y experimental para el caso de la reja limpia, donde podemos comprobar para dicha situación, que los resultados teóricos dan una aproximación aún más precisa respecto a los resultados experimentales.

En resumen, podemos concluir que las aproximaciones teóricas de los parámetros A y B dan unos ajustes muy buenos en todos los casos. Esta nueva metodología, nos permite calcular las curvas de eficiencia de captación de rejillas limpias y/o colmatadas, sin la necesidad de emplear recursos y tiempo en hacer ensayos en el laboratorio.

7.3 Reja modelo TEIDE: Patrón de colmatación C2

El siguiente patrón de colmatación que se ensaya en las instalaciones del laboratorio es el denominado C2, perteneciente al modelo de reja TEIDE. Este patrón de colmatación se consigue taponando los orificios pintados en la Figura 7.3.1 con yeso.

La reja modelo TEIDE con el patrón de colmatación C2 se observa en la siguiente figura:

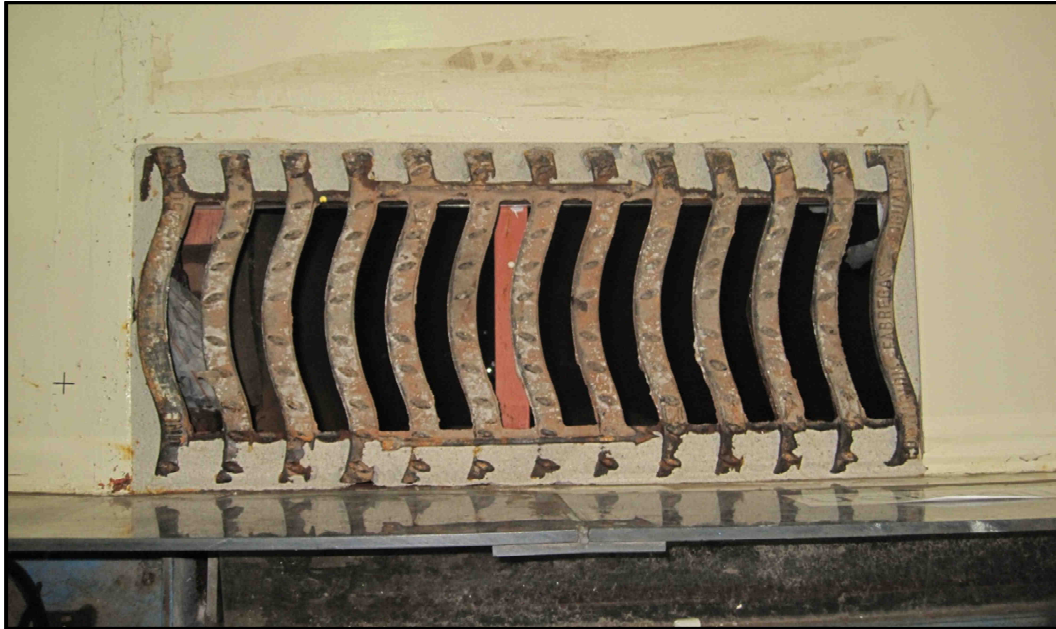


Figura 7.3.1 Sumidero TEIDE con el patrón C2.

A continuación, para ilustrar los resultados que se comentan, incluiremos aquellas gráficas pertinentes y que puedan aportar información visual para no dar información redundante. La totalidad de tablas y gráficas se encuentran en el *Anejo D Resultados experimentales de la reja Teide con patrón de colmatación C1 y C2*, y el *Anejo E Gráficas de los resultados experimentales de la reja Teide con patrón de colmatación C1 y C2*.

Si analizamos los datos obtenidos de las eficiencias según su caudal, podemos apreciar en la Figura 7.3.2 que a medida que aumentamos el caudal, la eficiencia de la reja disminuye drásticamente, pasando de valores máximos de hasta el 65 % de eficiencia para $Q = 25$ l/s, hasta valores de 11 % de eficiencia en las mismas condiciones para $Q=200$ l/s.

Si comparamos los valores de la Figura 7.3.2 con los valores obtenidos de la reja TEIDE C1, se aprecia que todas las pendientes se reducen respecto al patrón C1. Esto es lógico ya que el patrón C2 de la reja TEIDE, al concentrar una mayor superficie colmatada que el patrón C1, reduce aún más la capacidad de captación de la reja, resultando en una eficiencia algo menor.

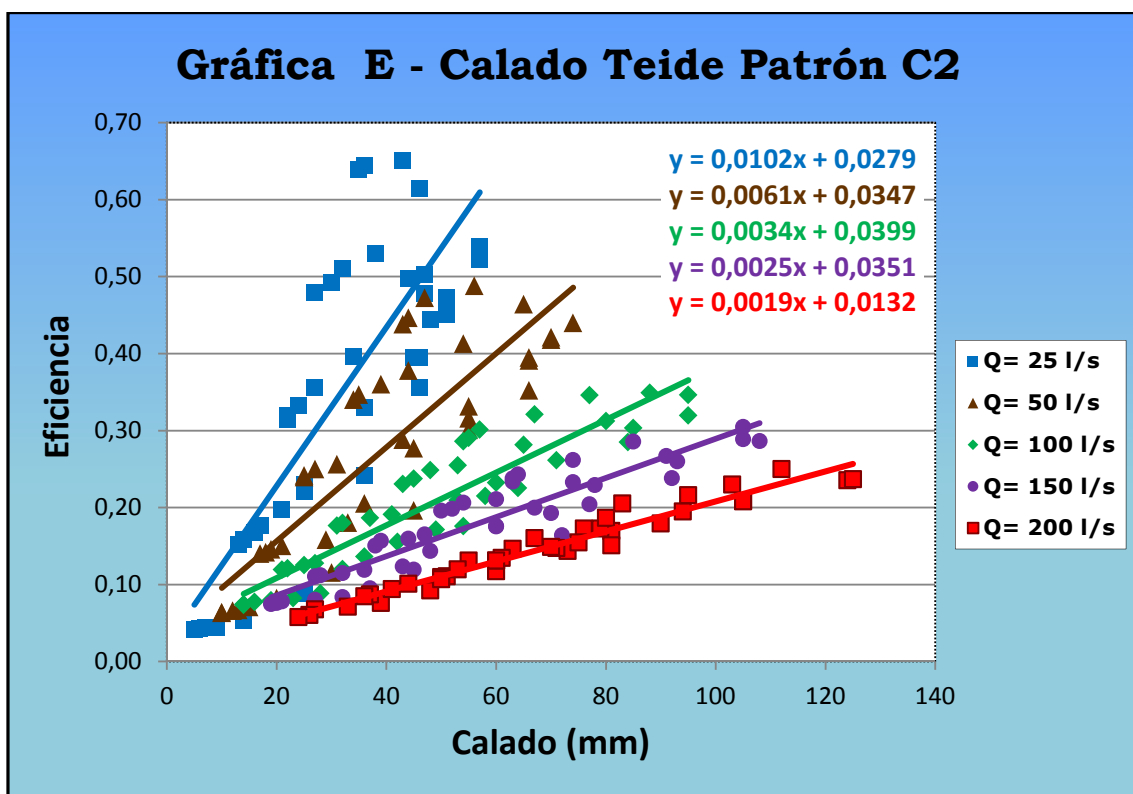
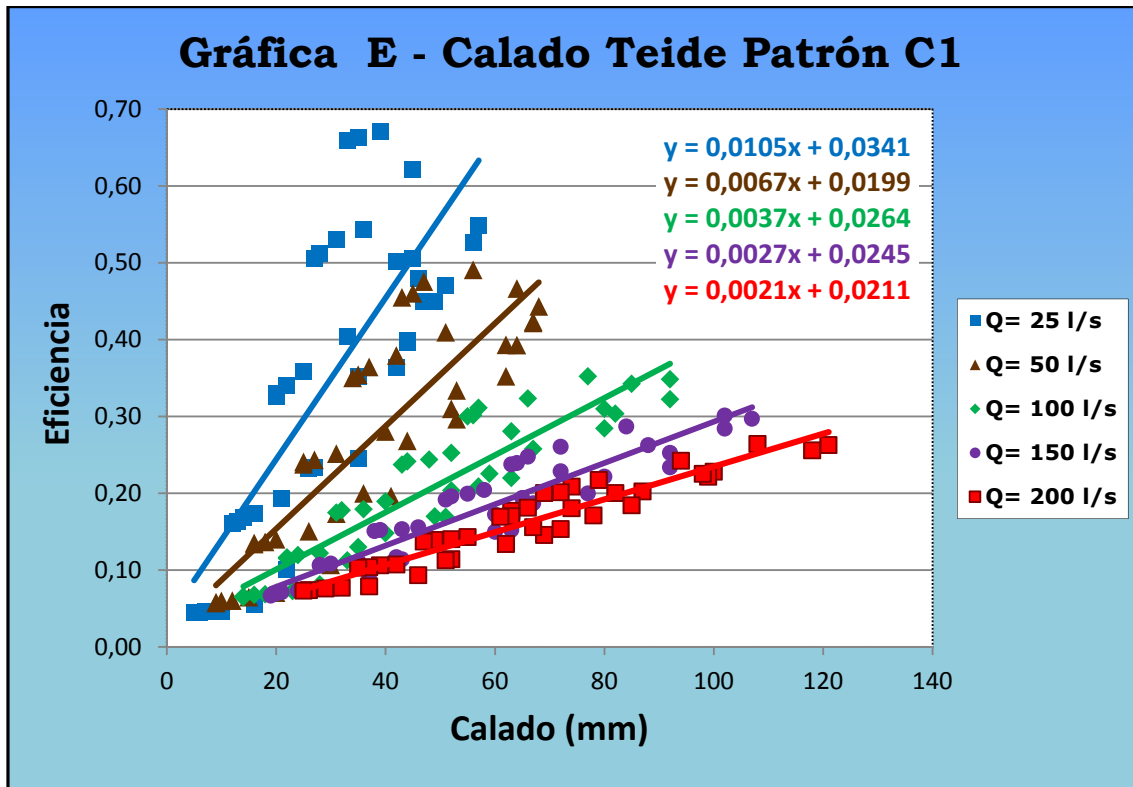


Figura 7.3.2. Gràfiques E – Calado para la reja Teide con el patrón de colmatación C1 y C2.

Si analizamos los resultados de las eficiencias de captación, con el patrón de colmatación C2 según la pendiente longitudinal, existe otro tipo de comportamiento. En general la eficiencia baja progresivamente al aumentar la pendiente longitudinal de la plataforma en todos los caudales estudiados.

Para pendientes elevadas, la disminución de la eficiencia de captación es mucho menos importante y casi podríamos decir que su valor se mantiene constante. Los resultados experimentales hacen que a veces de manera puntual suba un poco, pero la tendencia general es la descrita. Esta eficiencia que podríamos denominar como eficiencia límite o eficiencia residual se aprecia de forma especialmente clara para las pendientes transversales del 0 al 2%. Hay que notar que en estas condiciones el flujo está confinado por las dos paredes laterales.

Representando la pérdida de eficiencia respecto a la pendiente longitudinal, veremos que este crecimiento de las pérdidas en la mayoría de los caudales estudiados se produce siguiendo trayectorias paralelas entre las pendientes transversales (Figura 7.3.3).

Respecto al análisis según la pendiente transversal, se puede afirmar que a medida que aumenta el caudal de paso, el rango de variación de eficiencias según los valores de pendiente transversal se reduce; en otras palabras, la influencia de la pendiente transversal se aprecia sobre todo para caudales menores.

Para un caudal de 50 l/s y para un 10% de pendiente longitudinal, la eficiencia de captación es de un 44% para una pendiente transversal del 4%, y tan solo del 6 % para una pendiente transversal del 0%. Estos mismos datos para un caudal de 200 l/s serían 15% y 6% de eficiencia respectivamente.

Si comparamos estos resultados con la reja Teide C1 (Figuras 7.2.3 y 7.2.4), observamos que la reja Teide con patrón C2 se comporta de manera casi idéntica al caso con patrón C1. Solo se aprecian diferencias en pendientes transversales altas, donde la eficiencia de captación tiende a bajar un poco. Para el caudal 200 l/s con pendientes transversales altas, la eficiencia de captación se reduce hasta un 5%, en el resto de caudales y pendientes las diferencias no superan el 1-1,5%, y podríamos decir que la reja se comporta igual que con el patrón C1.

A priori este resultado nos sorprende un poco, ya que el patrón C2 concentra un área colmatada bastante superior a la del patrón C1.

Más adelante, esta conclusión quedará justificada en las Figuras 7.3.7 y la Tabla 7.3.8, donde la similitud del resto de parámetros y resultados experimentales, confirman que no hay diferencia significativa en términos de reducción de eficiencia, entre los dos patrones de colmatación.

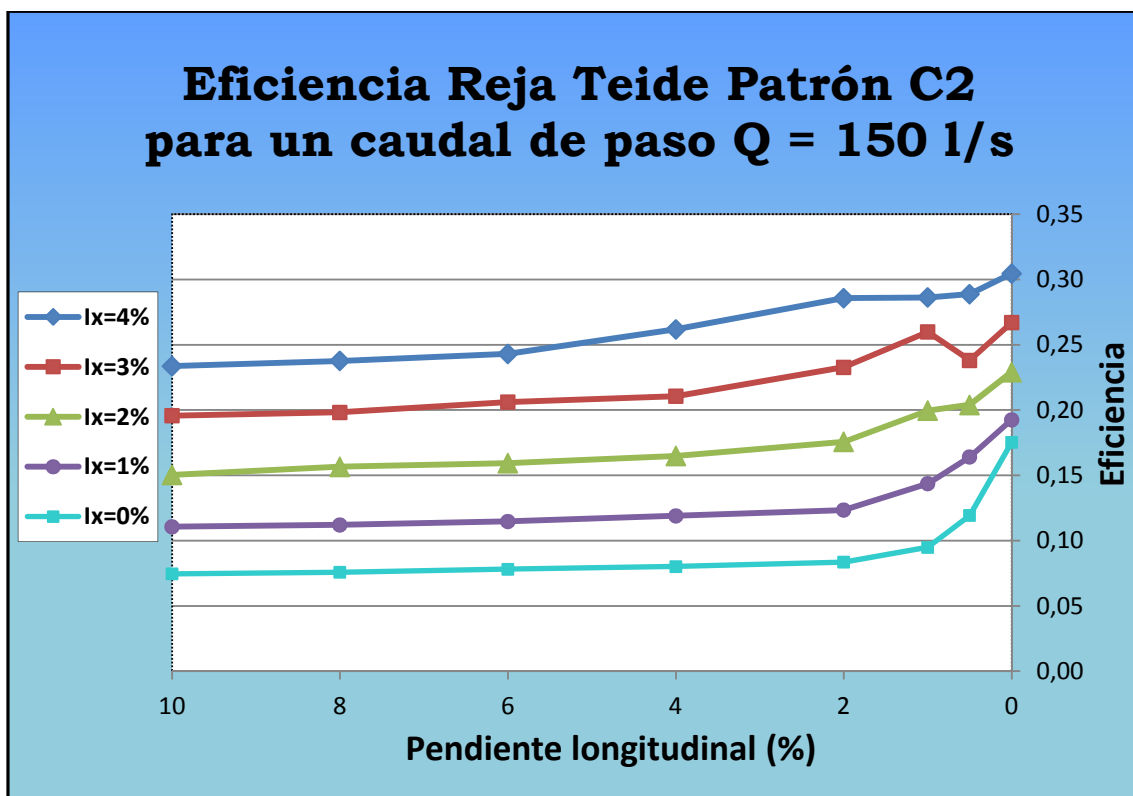
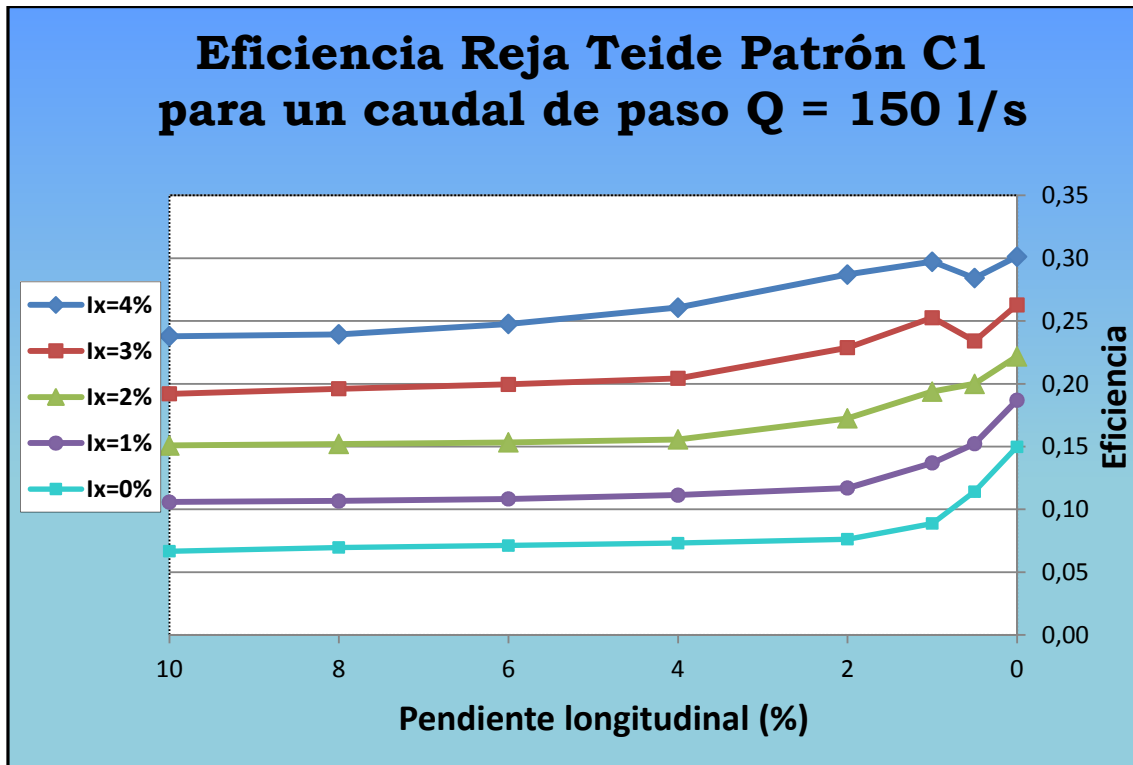


Figura 7.3.3 Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 y C2 para un caudal de 150 l/s.

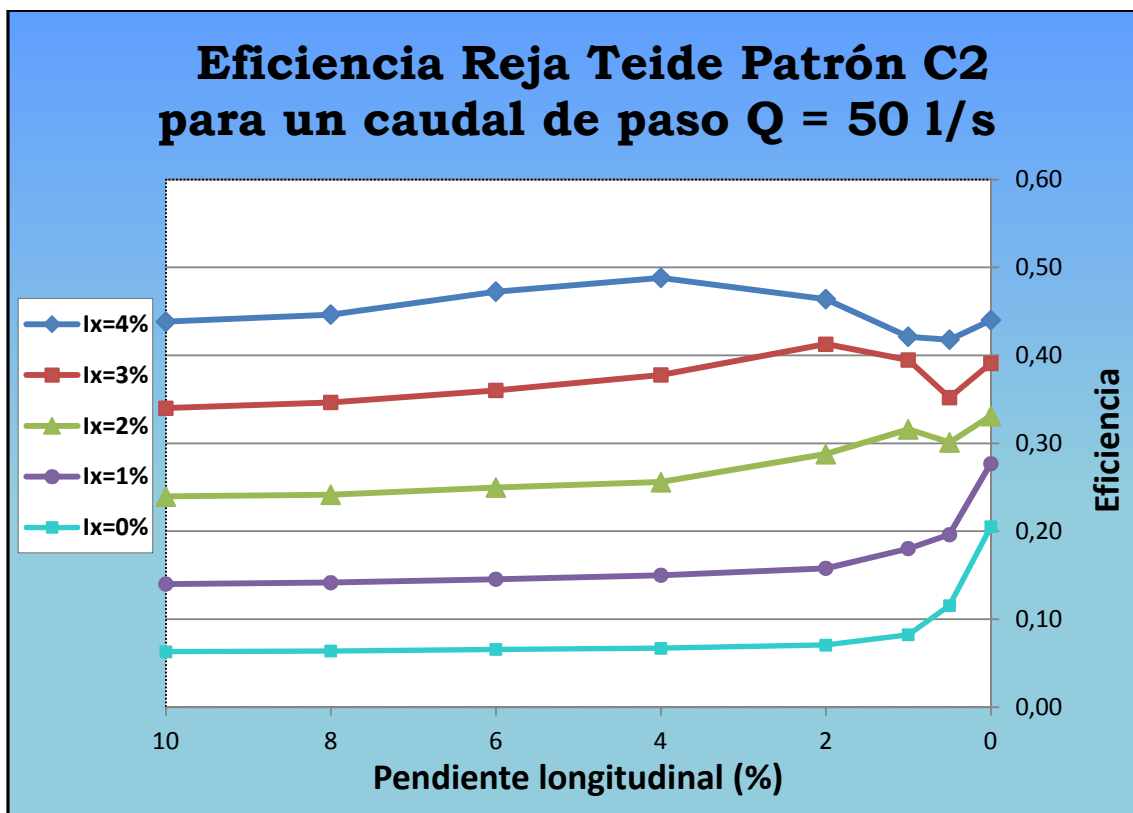
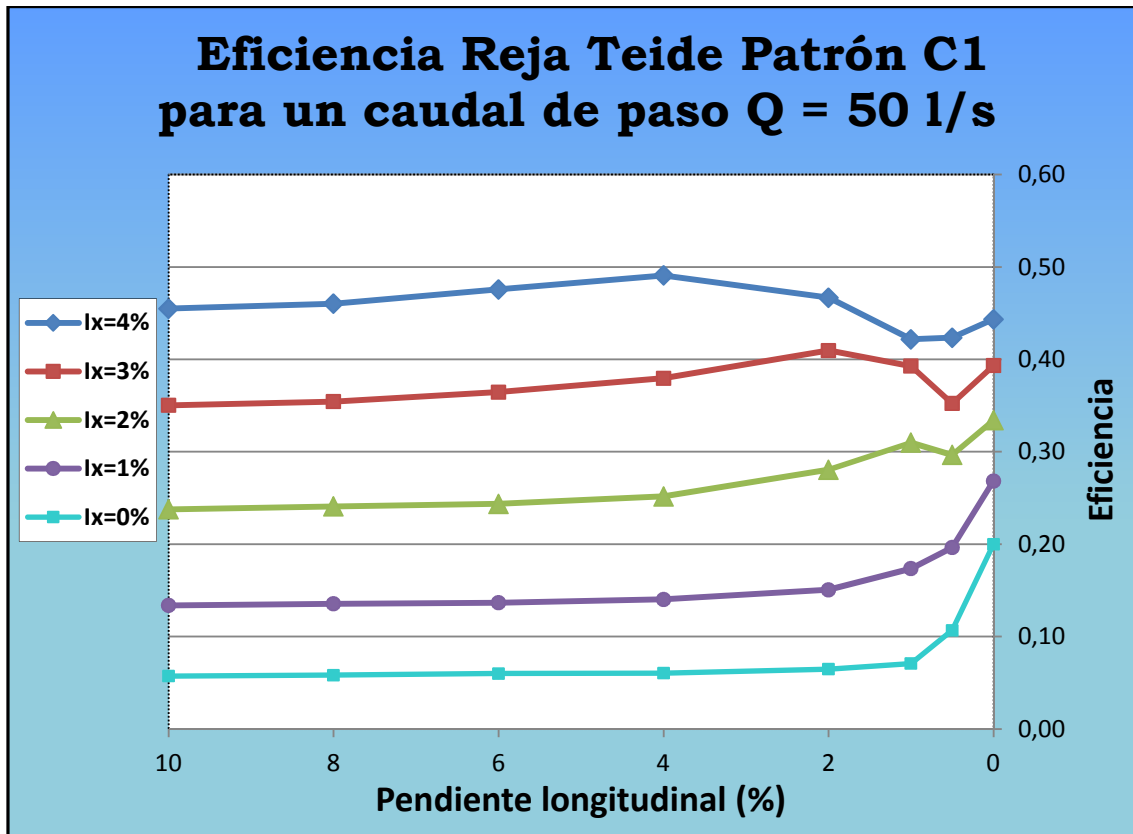


Figura 7.3.4 Eficiencia registrada en la reja Teide, con el patrón de colmatación C1 y C2 para un caudal de 50 l/s.

Si definimos el concepto pérdida de eficiencia, como:

$$\text{Pérdida de eficiencia (\%)} = (E_{C1} - E_{C2}) \cdot 100$$

Podemos representar la pérdida de eficiencia de la reja Teide, del patrón de colmatación C2 respecto al C1 (Figura 7.3.5).

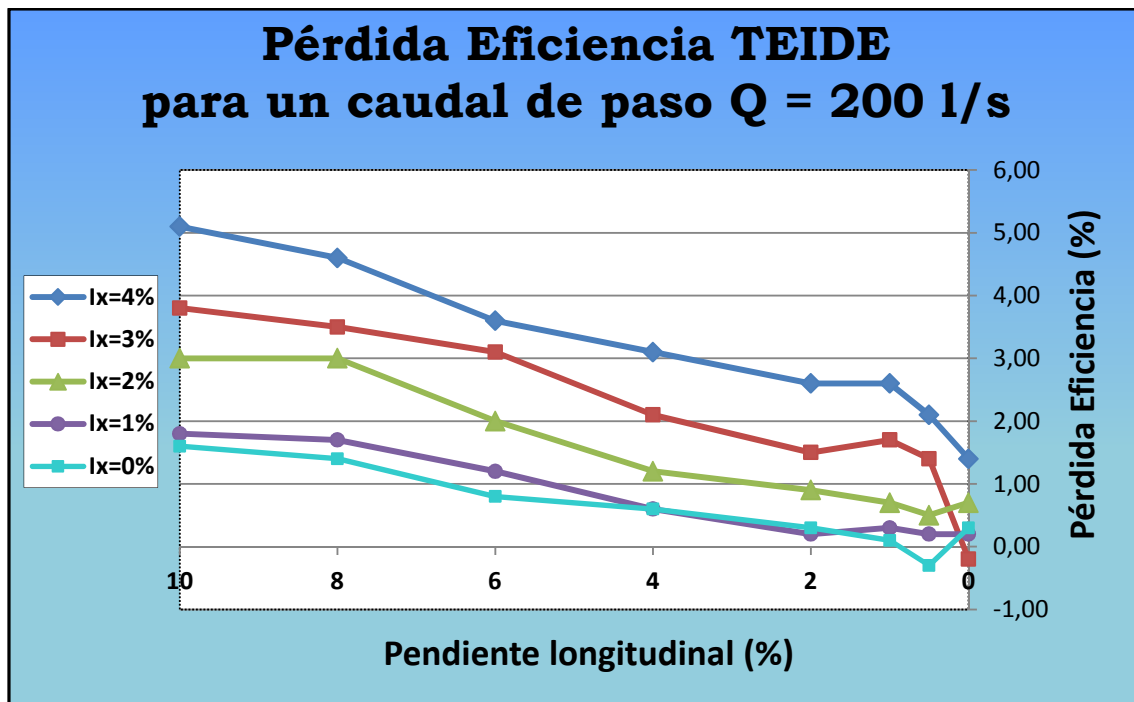
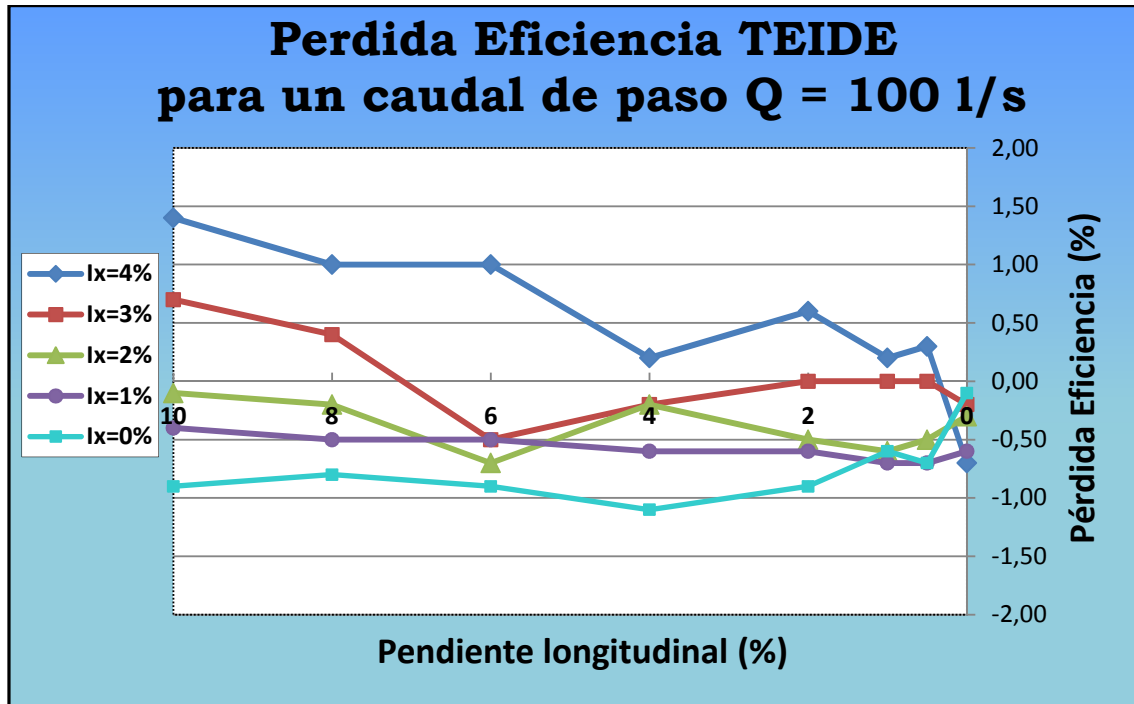


Figura 7.3.5. Pérdida de eficiencia registrada en el modelo de reja TEIDE, con el patrón de colmatación C2 respecto al patrón C1 para los caudales de 100 y 200 l/s.

Una primera observación es que para caudales altos, las pérdidas de eficiencia siguen trayectorias paralelas entre las diferentes pendientes transversales. Este comportamiento no es tan evidente para caudales medios y bajos.

Los resultados indican que a medida que se incrementa la pendiente transversal, las pérdidas de eficiencia de captación aumentan un poco.

Las pérdidas mayores se dan en el caudal de $Q=200$ /s en condiciones de altas pendientes longitudinales y transversales, llegando a valores máximos del 5%.

En el resto de caudales y condiciones, las pérdidas registradas no son significativas y se sitúan alrededor del 0,5 - 1 %. Por lo tanto, en la mayoría de caudales y geometrías, patrones C1 y C2 se comportan de manera muy similar.

Representando de manera tridimensional, colocando en los ejes X e Y las pendientes longitudinales y trasversales, y en el eje Z la eficiencia medida, obtendremos un mapa de las eficiencias para cada posible geometría.

Esto es posible observarlo en la Figura 7.3.6, donde las eficiencias mayores reciben un color más claro que las menores, las cuales, pueden causar problemas de inundación de darse en calles donde las rejillas dispuestas se encuentran colmatadas siguiendo el patrón de colmatación C2.

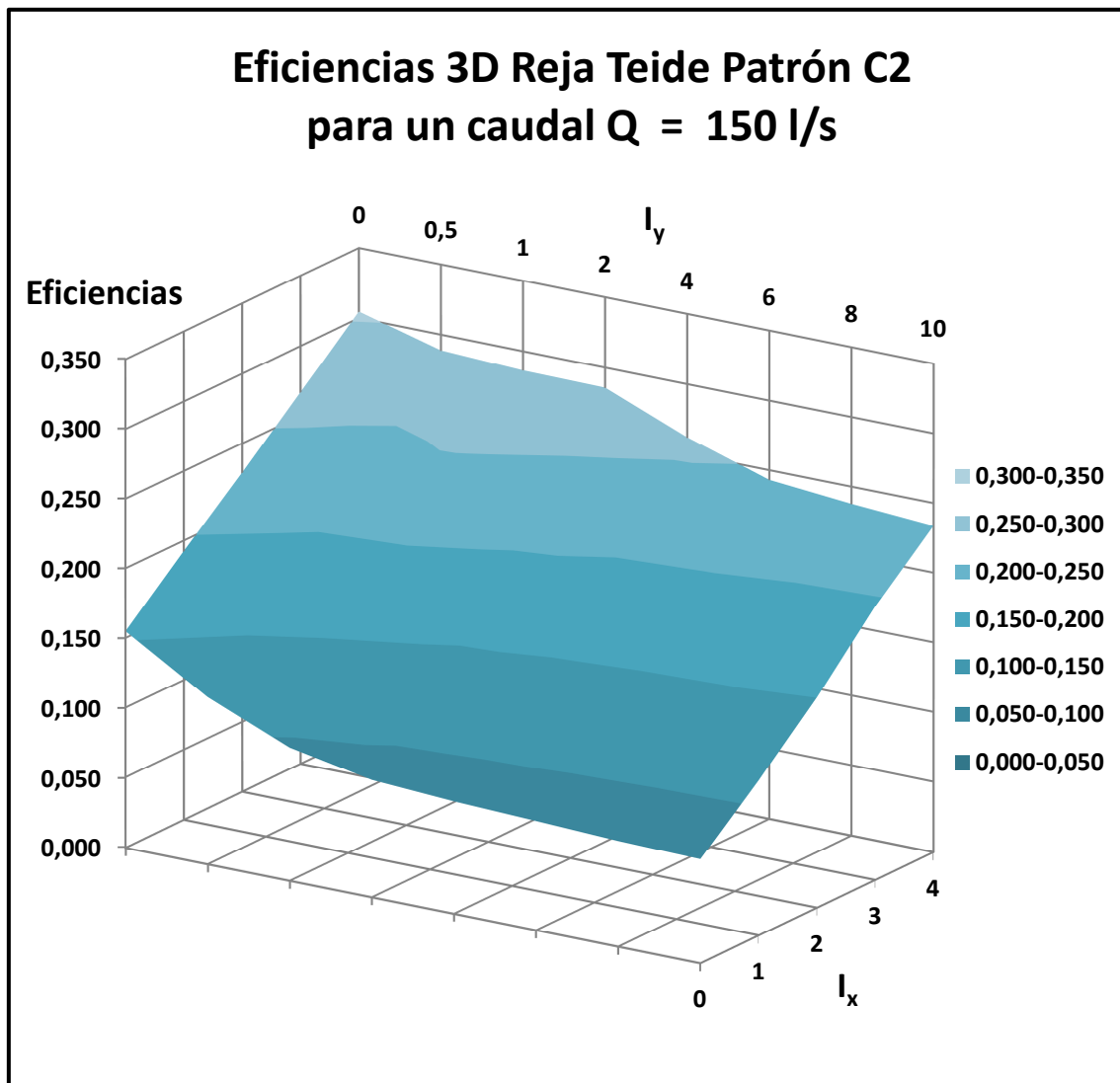


Figura 7.3.6. Eficiencias registradas en la reja TEIDE con el patrón de colmatación C2, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (I_x) y longitudinal (I_y).

Recordemos que las rejillas se disponen en la calle según su eficiencia, calculando la distancia entre éstas mediante el método de transformación de lluvia-escurrimiento aplicándose el modelo de la Onda Cinemática junto a los criterios de peligrosidad, para prevenir riesgos y daños, como por ejemplo los siguientes:

- Velocidad del agua (v) < 1.5 m / s
- Calado alcanzado por la lámina de agua (y) < 6 cm
- $v \cdot y$ < 0.5 m² / s

Analizadas las conclusiones que se desprenden de los estudios anteriores [2] [3], para las rejillas limpias y colmatadas, se puede proponer una relación potencial entre la eficiencia de captación (E) y el cociente caudal circulante por la calle sobre calado inmediatamente antes de la rejilla (Q/y).

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (7.1)$$

Procuraremos realizar el ajuste anteriormente comentado para los resultados cedidos y los obtenidos en los ensayos en el laboratorio, relacionando la eficiencia con el cociente entre el caudal y el calado (Q/y). Se observa en los datos medidos y cedidos, que para caudales bajos aumenta la dispersión de los resultados. Esto es debido a que cuando circula una lámina de agua de unos pocos milímetros, por una plataforma que no es perfectamente lisa, se producen efectos locales que afectan a la fiabilidad de los resultados.

Una vez situados todos los datos experimentales del ensayo de la rejilla Teide C2 en una misma gráfica Excel, se realiza el ajuste potencial para obtener la curva de eficiencia de captación (E , Q/y) y los parámetros A y B . Estos resultados se detallan en la Tabla 7.3.7 y en la Figura 7.3.8.

Reja nº 6 TEIDE	Reja Limpia	Patrón C1	Variación (%)	Patrón C2	Variación (%)
A_{experimental}	0,425	0,340	- 25,00 %	0,327	- 29,97 %
B_{experimental}	0,714	0,800	+ 12,05 %	0,790	+ 10,64 %
A_{teórica}	0,411	0,365	- 12,60 %	0,311	- 32,15 %
B_{teórica}	0,714	0,777	+ 8,82 %	0,790	+ 10,64 %

Tabla 7.3.7. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto a la rejilla limpia ideal Teide.

Reja nº 6 TEIDE	$\frac{A_{experimental}}{A_{teórica}}$	$\frac{B_{experimental}}{B_{teórica}}$
Reja Limpia	1,034	1,000
Patrón C1	0,932	1,030
Patrón C2	1,051	1,000

Tabla 7.3.8. Variación de los Parámetros A y B , según las aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[3] Martínez, Pablo. (2000), *Estudio de eficiencia de captación de rejillas y criterios de ubicación en viales urbanos*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Cuando una reja sufre algún tipo de colmatación, generalmente el parámetro A disminuye de forma importante, en cambio el parámetro B, tiene tendencia a mantenerse constante o aumentar levemente. Solamente en algunos casos con rejas gravemente colmatadas (C3), se observa que el valor de B aumenta de forma significativa, pero su variación en valor absoluto respecto al parámetro original, siempre es menor que la que sufre el parámetro A.

La variación de los coeficientes entre la reja limpia y el patrón C2 patente en la Tabla 7.3.8, también se aprecia en la Figura 7.3.9, donde podemos observar como los resultados del ensayo para la reja Teide con patrón C2 se agrupan alrededor a un nuevo ajuste potencial, teniendo esta curva de eficiencia (E, Q/y) una trayectoria más baja respecto la curva de eficiencia (E, Q/y) para la misma reja en estado limpio.

Este resultado es coherente, ya que un estado de colmatación siempre provoca una pérdida de eficiencia captación sobre la reja.

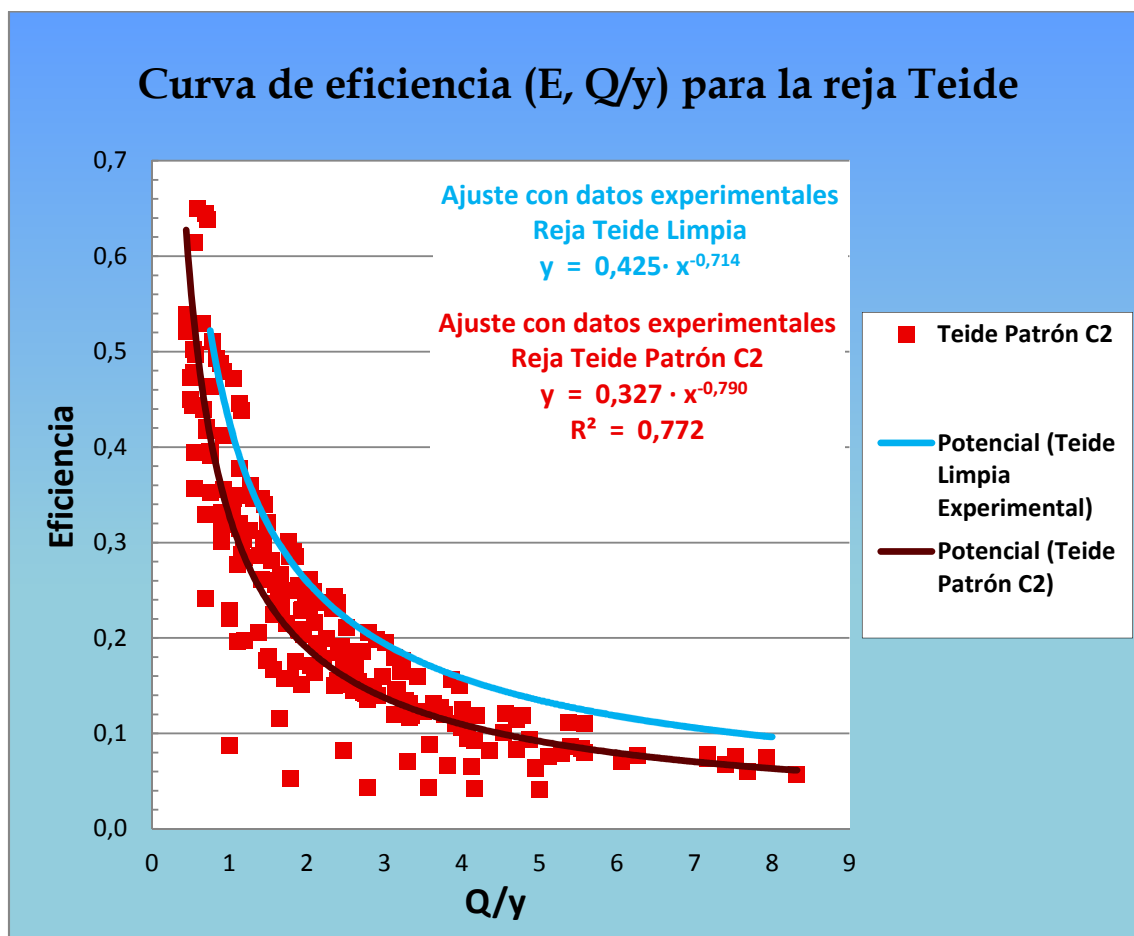


Figura 7.3.9. Curva de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatada con el patrón C2.

De la buena relación que se pueda establecer de entre estos dos ajustes depende en gran medida el coeficiente de seguridad, que se otorgará a la ecuación (7.1) en el siguiente capítulo, como medida para prever las posibles variaciones introducidas por la colmatación de la reja.

A continuación, a partir de la formulación descrita en el apartado 5.2 (*Estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia*) y el ajuste potencial descrito anteriormente, podemos definir la curva de eficiencia (E, Q/y) de la reja Teide, a partir de los A y B aproximados de forma teórica.

De esta manera, también podemos aproximar de forma teórica el comportamiento hidráulico de las rejas y compararlo con los resultados experimentales (Figuras 7.3.10 y 7.3.11).

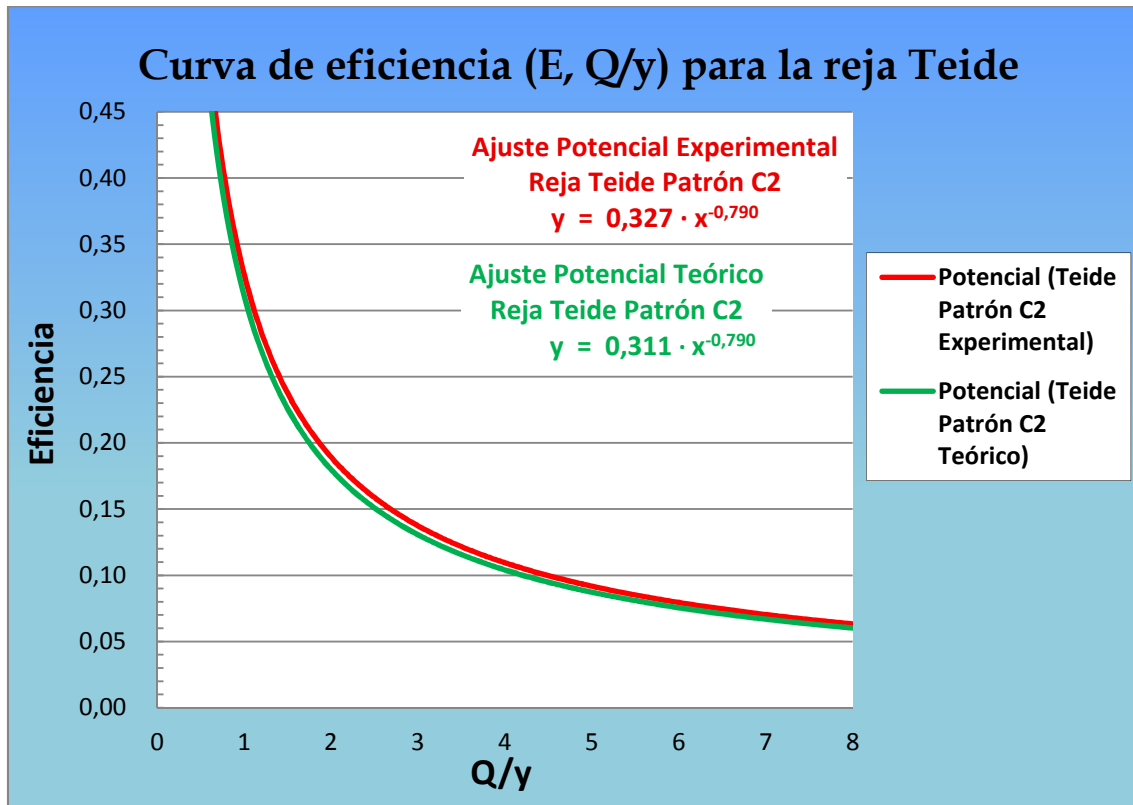


Figura 7.3.10. Curva de eficiencia para la reja Teide colmatada con el patrón C2.

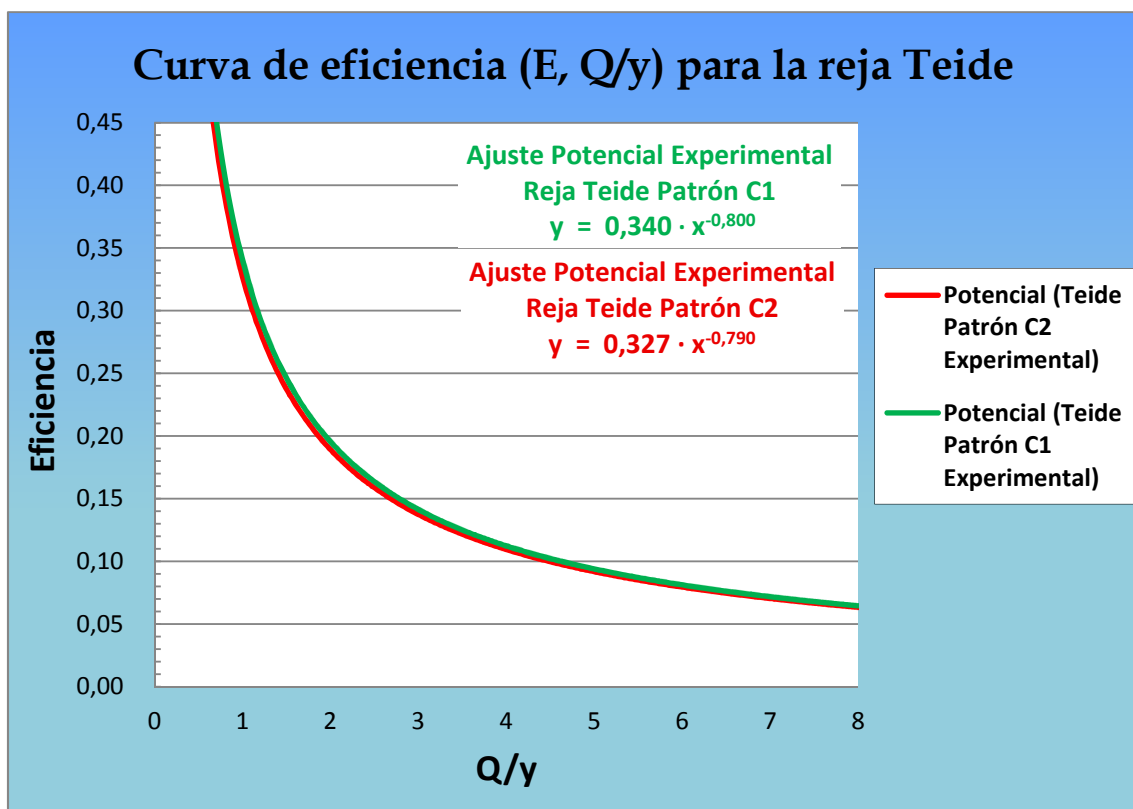


Figura 7.3.11. Curva de eficiencia para la reja Teide para estado colmatado C1 y C2.

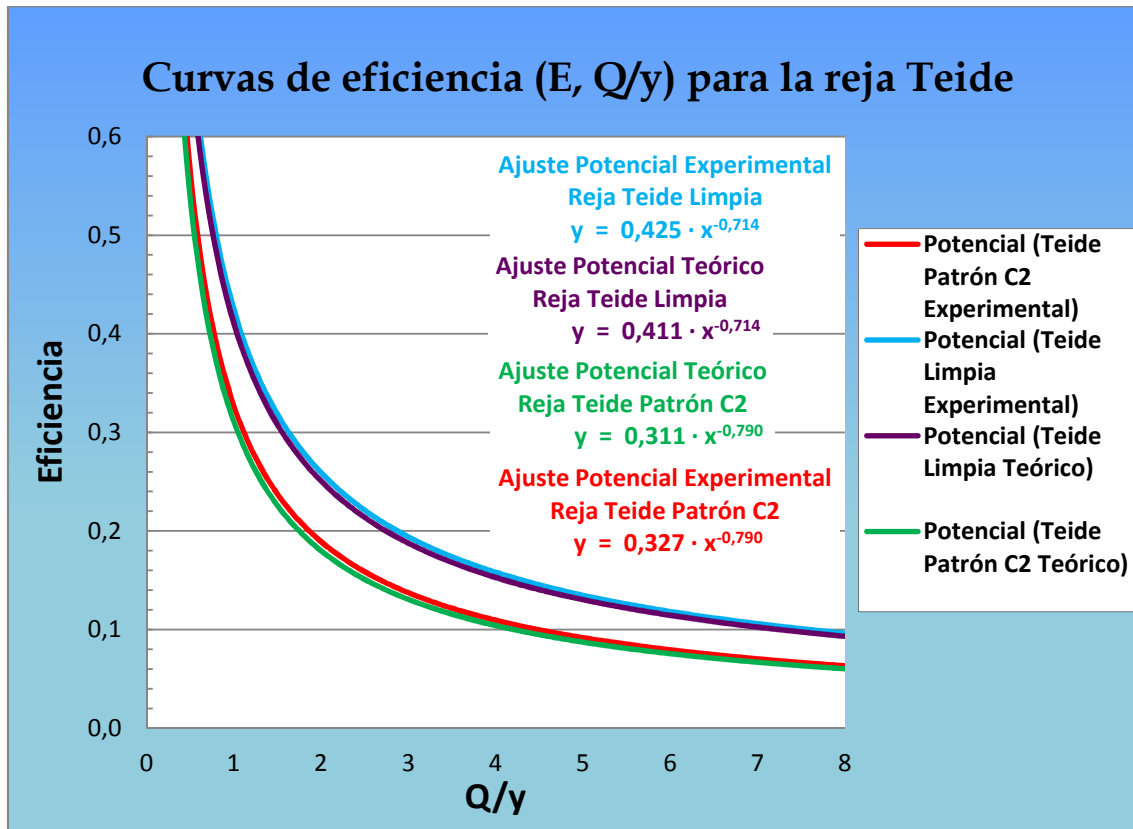


Figura 7.3.12. Resumen curvas de eficiencia para la reja Teide para su estado limpio y colmatado con el patrón C2.

Reja nº 5 TEIDE	Patrón C1	Patrón C2	Variación (%)
A	0,340	0,327	- 3,98 %
B	0,800	0,790	- 1,27 %

Tabla 7.3.13 Diferencia entre los parámetros A y B experimentales de la reja Teide para los patrones C1 y C2.

Se puede apreciar el buen ajuste entre los datos teóricos y los datos experimentales en las figuras anteriores. Ambas formulaciones, la experimental y la teórica, dan unos resultados muy parecidos. Las curvas de eficiencia de captación (E, Q/y) para la reja Teide C2 son paralelas y casi coincidentes, con una diferencia menor al 2%. Estos resultados eran de esperar dada la similitud de los parámetros A y B según la Tabla 7.3.8.

Otro resultado interesante es el que obtenemos en la Figura 7.3.11 y Tabla 7.3.13, en la cual podemos volver apreciar lo que habíamos descrito previamente. Todos los resultados experimentales de los patrones C1 y C2 de colmatación de la reja Teide son casi idénticos. Se confirma que no hay diferencia significativa ($\leq 1\%$), en términos de reducción de eficiencia, entre los dos patrones de colmatación.

Adicionalmente, en la Figura 7.3.12 también se ha añadido el ajuste teórico potencial y experimental para el caso de la reja limpia, donde también podemos comprobar, que la aproximación teórica da unos resultados muy precisos respecto a los resultados experimentales.

En resumen, podemos concluir que las aproximaciones teóricas de los parámetros A y B dan unos ajustes excelentes en todos los casos (reja limpia, colmatación C1 y C2). Esta nueva metodología, nos permite calcular las curvas eficiencias de captación de rejillas limpias y/o colmatadas, sin la necesidad de emplear recursos y tiempo en hacer ensayos en el laboratorio.

7.4 Reja modelo BARCELONA: Patrón de colmatación C3

El último patrón de colmatación que se ensaya en las instalaciones del laboratorio es el denominado C3, perteneciente al modelo de reja BARCELONA. Este patrón de colmatación se consigue taponando los orificios pintados en la Figura 7.4.1 con yeso.

El patrón C2 de la reja BARCELONA, dado que sólo afectaba a una área reducida de la reja ($\approx 15\%$), y que según el análisis teórico del apartado 5.1, los coeficientes A y B no variaban significativamente respecto el caso de la reja limpia, se ha optado por no realizar este ensayo al no provocar una pérdida significativa de eficiencia de la reja ($\leq 1\%$).

La reja modelo BARCELONA con el patrón de colmatación C3 se observa en la siguiente figura:



Figura 7.4.1 Sumidero BARCELONA con el patrón C3 y dirección del flujo de agua.

A continuación, para ilustrar los resultados que se comentan, incluiremos aquellas gráficas pertinentes y que puedan aportar información visual para no dar información redundante. La totalidad de gráficas y tablas se encuentran en el *Anejo F Resultados experimentales de la reja nº 5 Barcelona limpia y con patrón de colmatación C3* y *Anejo G Gráficas de los resultados experimentales de la reja nº 5 Barcelona limpia y con patrón de colmatación C3*.

Si analizamos los datos obtenidos de las eficiencias según su caudal, y se comparan con los valores cedidos de estudios anteriores [6] para la reja limpia, se aprecia en la Figura 7.4.2 que las pendientes se reducen en todos los casos. Esto es lógico ya que la reja Barcelona colmatada tiene menos capacidad de captación (y menos eficiencia) que la misma en estado limpio, por lo tanto una pendiente menor.

También se puede apreciar que a medida que aumentamos el caudal, la eficiencia de la reja disminuye drásticamente, pasando de valores máximos de hasta el 52% de eficiencia para $Q = 25$ l/s, hasta valores de 8-9 % de eficiencia en las mismas condiciones para $Q=200$ l/s.

[6] Gómez M. y Russo B. (2006), *Análisis de la capacidad hidráulica de la reja Barcelona del grupo Norinco*. (Estudio realizado a petición de la Fundación Agbar). Grup de Recerca FLUMEN, Departament de Ingenieria Hidràulica, Marítima y Ambiental de ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

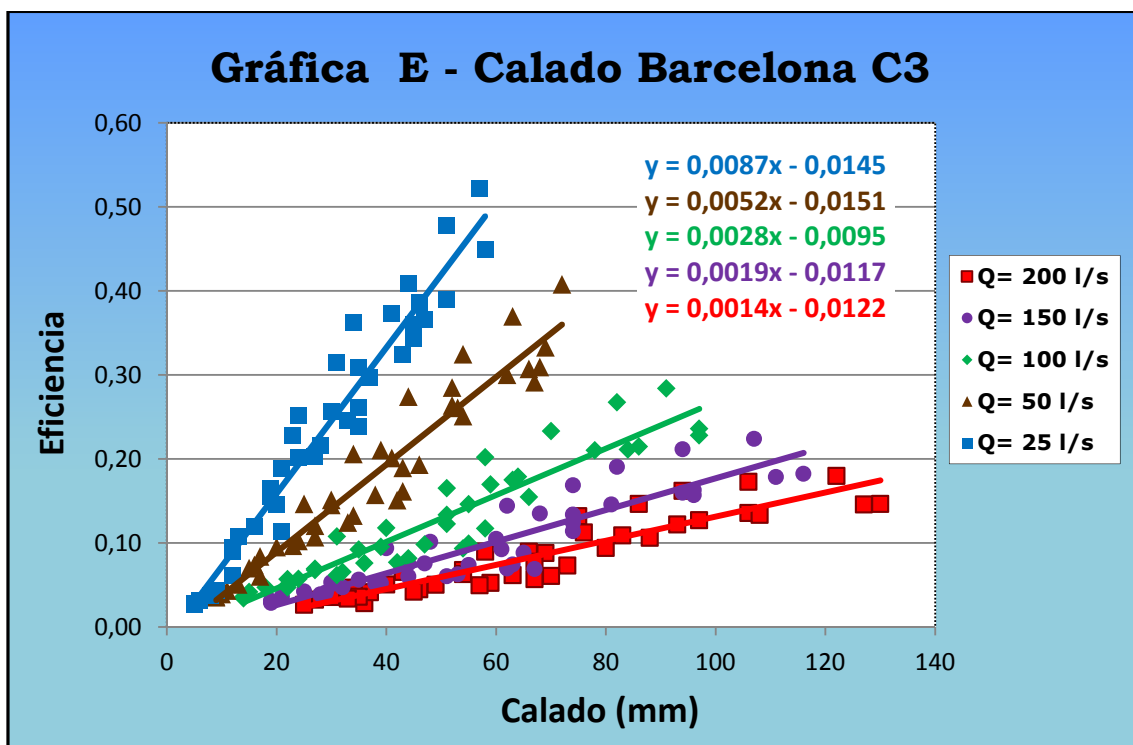
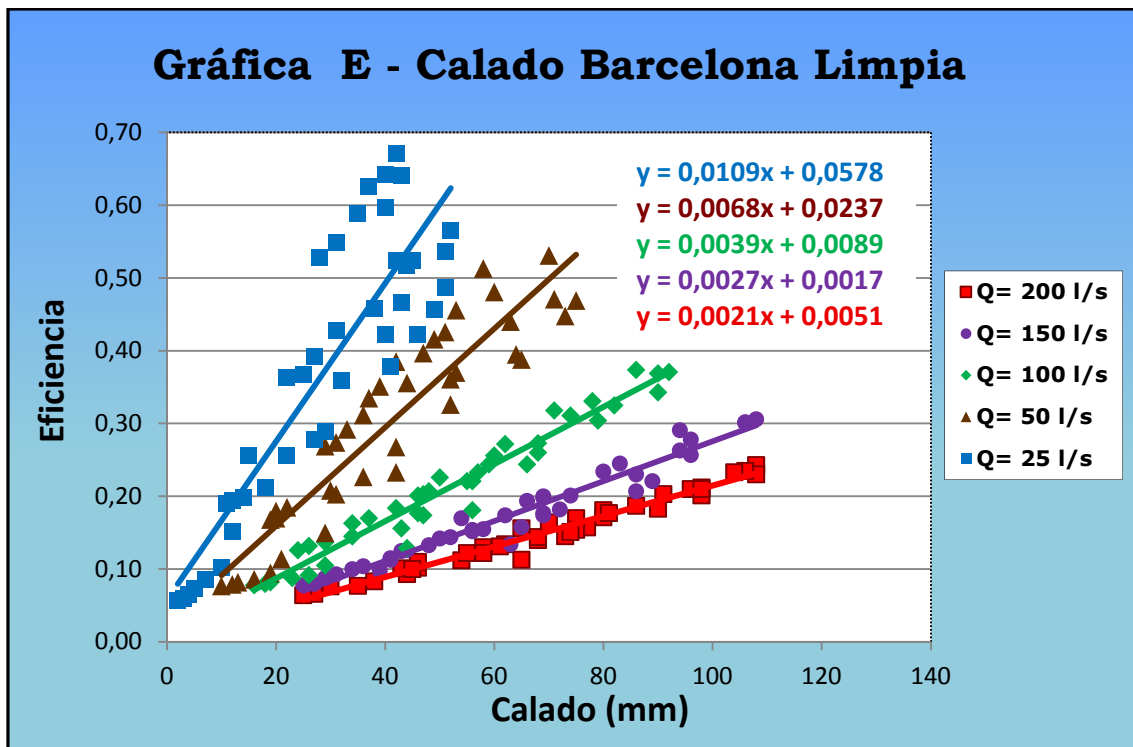


Figura 7.4.2. Gràfics E – Calado para la reja Barcelona en estado limpio y con el patrón de colmatación C3.

Si analizamos los resultados de las eficiencias de captación, con el patrón de colmatación C2 según la pendiente longitudinal, existe otro tipo de comportamiento. En general la eficiencia baja progresivamente al aumentar la pendiente longitudinal de la plataforma en todos los caudales estudiados.

Para pendientes elevadas, la disminución de la eficiencia de captación es mucho menos importante y casi podríamos decir que su valor se mantiene constante. Los resultados experimentales hacen que a veces de manera puntual suba un poco, pero la tendencia general es la descrita. Esta eficiencia que podríamos denominar como eficiencia límite o eficiencia residual se aprecia de forma especialmente clara para las pendientes transversales del 0 al 2%. Hay que notar que en estas condiciones el flujo está confinado por las dos paredes laterales.

Representando la pérdida de eficiencia respecto a la pendiente longitudinal, veremos que este crecimiento de las pérdidas en la mayoría de los caudales estudiados se produce siguiendo trayectorias paralelas entre las pendientes transversales (Figuras 7.4.3 y 7.4.4).

Respecto el análisis según la pendiente transversal, se puede afirmar que a medida que aumenta el caudal de paso, el rango de variación de eficiencias según los valores de pendiente transversal se reduce, en otras palabras, la influencia de la pendiente transversal se aprecia sobre todo para caudales menores.

Para un caudal de 50 l/s y para un 10% de pendiente longitudinal, la eficiencia de captación es de un 15% para una pendiente transversal del 4%, y tan solo del 3,5% para una pendiente transversal del 0%. Estos mismos datos para un caudal de 200 l/s serían 6% y 3% de eficiencia respectivamente.

Finalmente, decir que al acercarnos a la pendiente longitudinal del 10%, las eficiencias producidas para cada una de las diferentes pendientes transversales tienden a encontrarse entre ellas, acercándose las diferentes líneas paralelas mientras tienden a la eficiencia residual, lo que indica que la pendiente transversal también juega un papel menos importante, a medida que aumentamos la pendiente longitudinal.

Si comparamos estos resultados con la reja Barcelona Limpia (ver Figuras 7.4.3 y 7.4.4), observamos que en todos los casos, la reja Barcelona con patrón C3 tiene menos eficiencia de captación, como era de esperar.

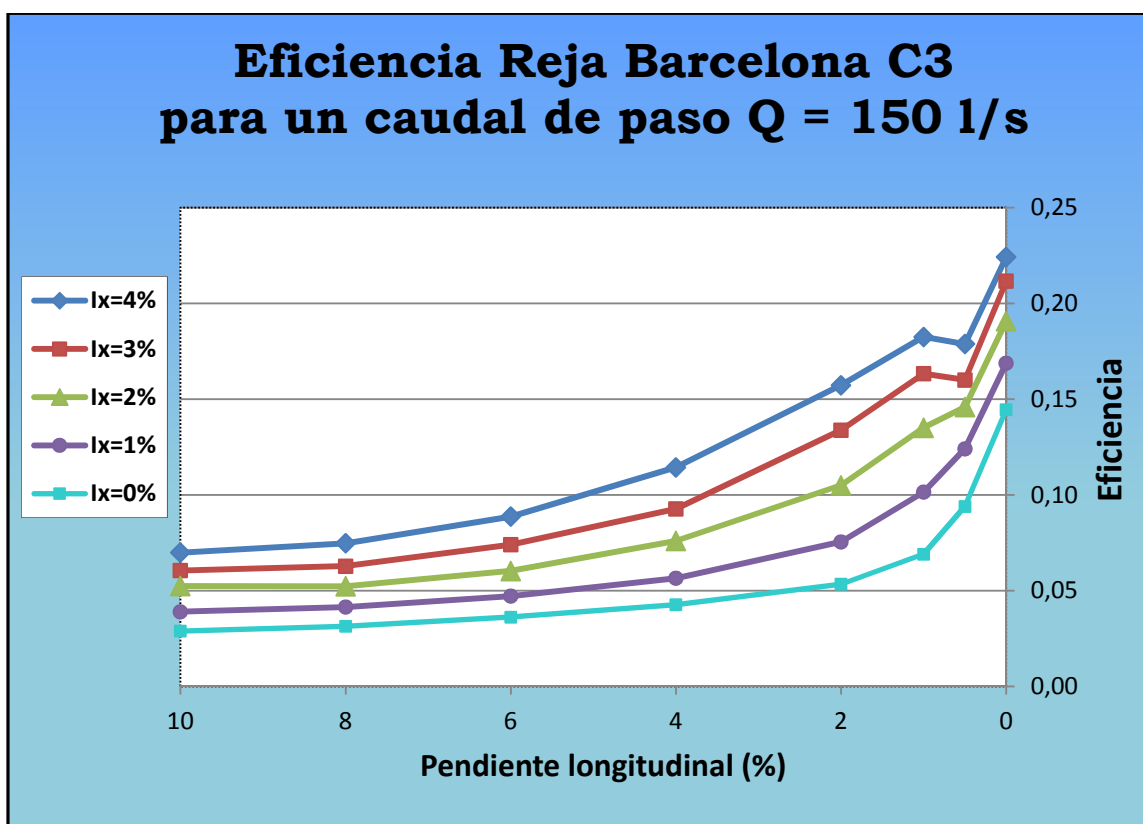
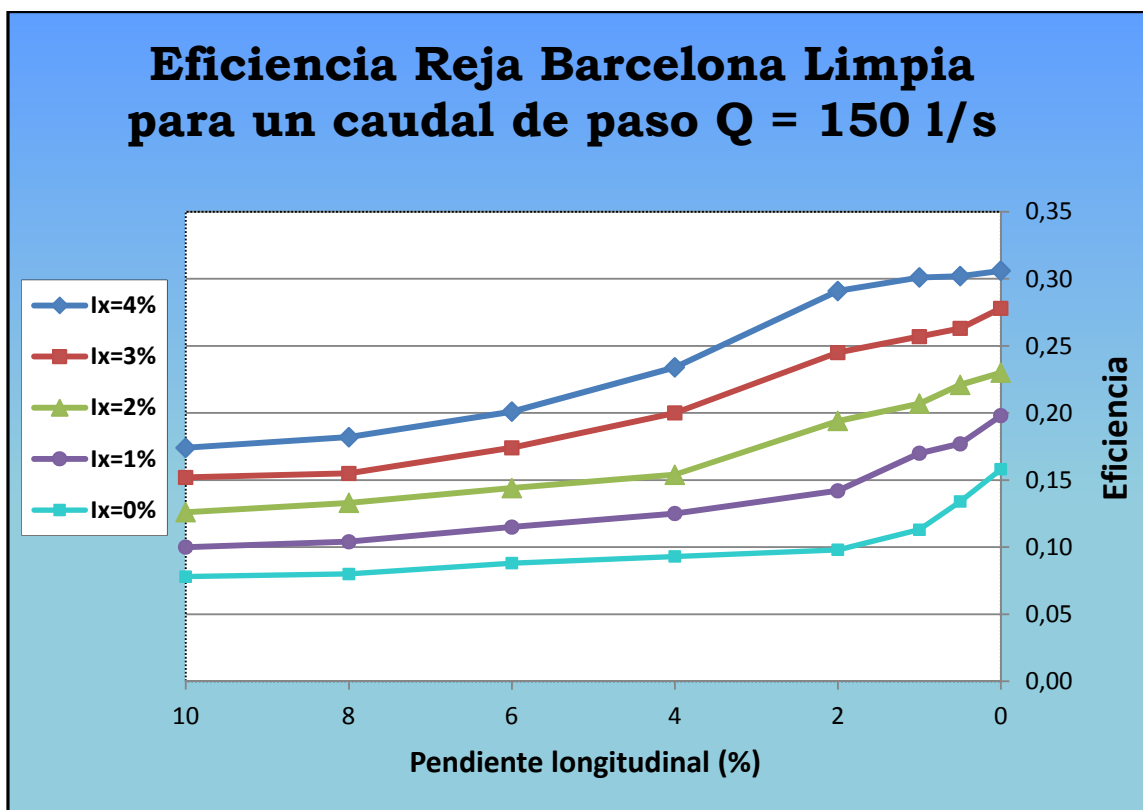


Figura 7.4.3. Eficiencia registrada en la reja Barcelona, en condiciones limpias y con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 150 l/s.

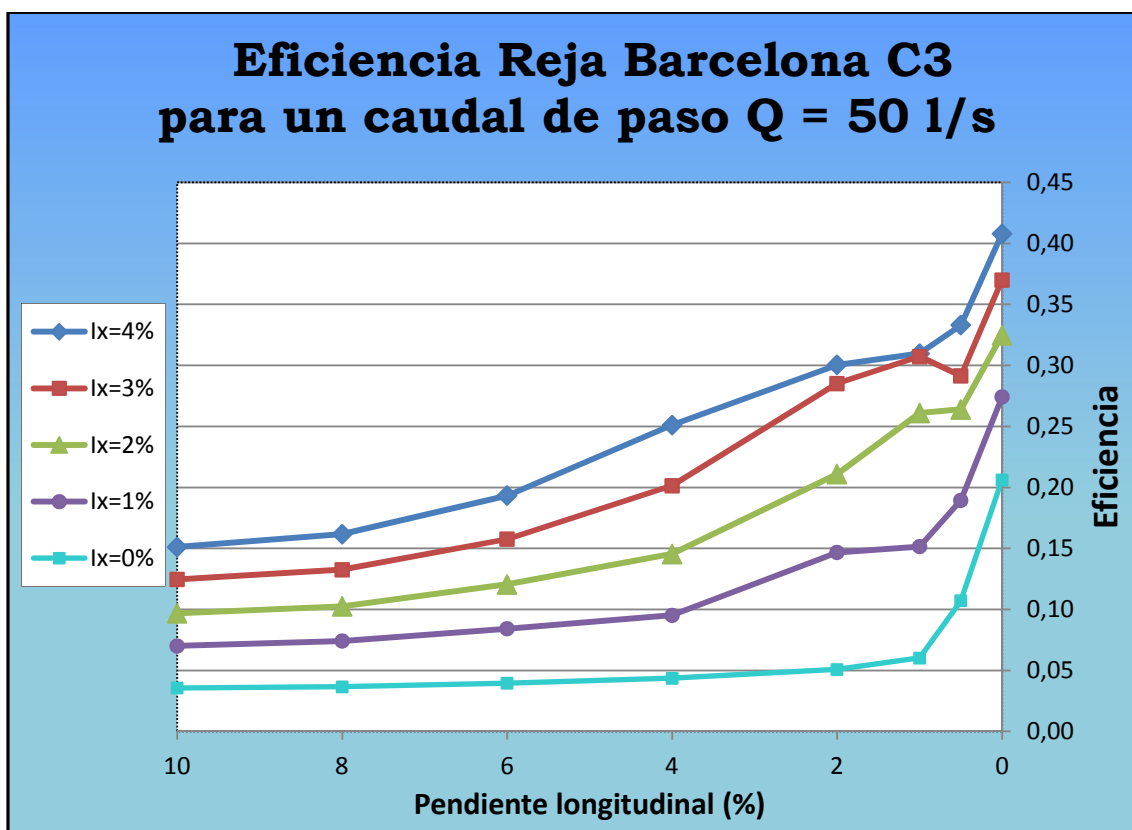
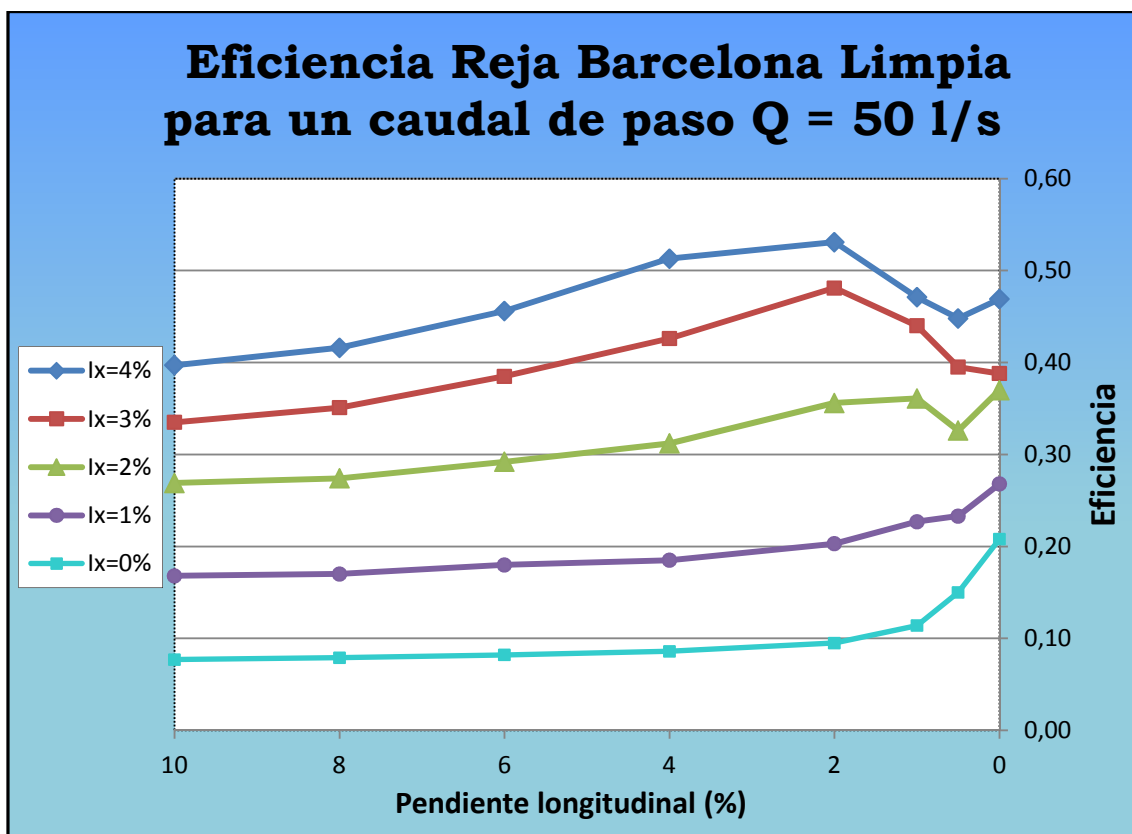


Figura 7.4.4. Eficiencia registrada en la reja Barcelona, en condiciones limpias y con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 50 l/s.

Si definimos el concepto pérdida de eficiencia, como:

$$\text{Pérdida de eficiencia (\%)} = (E_{\text{Limpia}} - E_{C3}) \cdot 100$$

Podemos representar la pérdida de eficiencia de la reja Barcelona, con patrón de colmatación C3 respecto a condiciones limpias (Figura 7.4.5).

Una primera observación es que las pérdidas de eficiencia siguen trayectorias paralelas entre las diferentes pendientes transversales, y tienden a estabilizarse a partir de pendientes longitudinales del 2%. Los resultados indican que a medida que se incrementa la pendiente transversal, mayores son las pérdidas de eficiencia de captación.

En general, las pérdidas mayores se dan en los caudales bajos con condiciones de altas pendientes longitudinales y transversales, llegando a valores superiores al 30%, sin embargo, fuera de estas condiciones, las pérdidas registradas no son tan significativas y se sitúan alrededor del 5 - 10 %.

En algunos casos con pendientes longitudinales cercanas al 0%, llegan incluso a anularse.

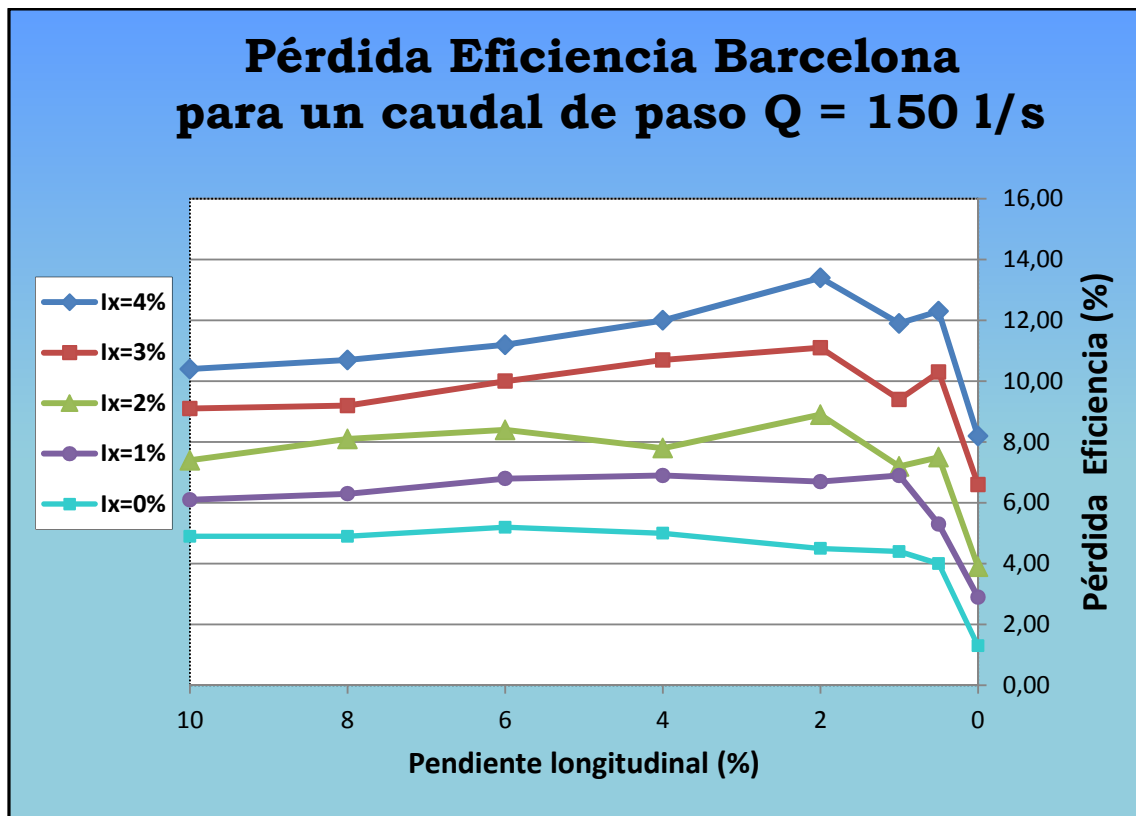


Figura 7.4.5. Pérdida de eficiencia registrada en el modelo de reja BARCELONA con el patrón de colmatación C3 para un caudal de 150 l/s respecto a la misma reja en condiciones limpias.

Si representamos los datos de manera tridimensional, colocando en los ejes X e Y las pendientes longitudinales y transversales, y en el eje Z la eficiencia medida, obtendremos un mapa de las eficiencias para cada posible geometría.

Esto es posible observarlo en la Figura 7.4.6, donde las eficiencias mayores reciben un color más claro que las menores, las cuales, pueden causar problemas de inundación de darse en calles donde las rejillas dispuestas se encuentran colmatadas siguiendo el patrón de colmatación C3.

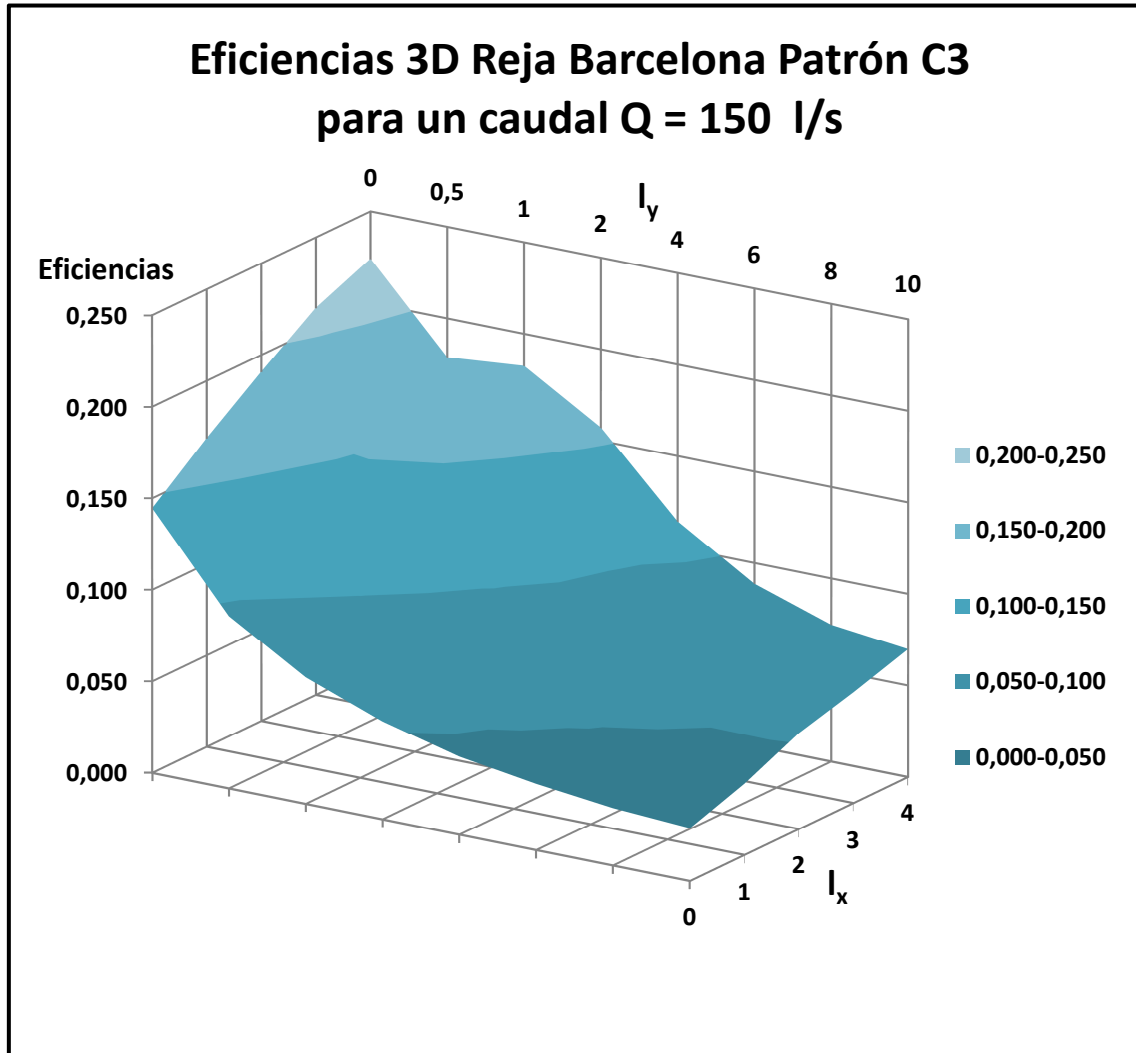


Figura 7.4.6. Eficiencias registradas en la reja BARCELONA con el patrón de colmatación C3, para un caudal de 150 l/s según la pendiente transversal (I_x) y longitudinal (I_y).

Recordemos que las rejillas se disponen en la calle según su eficiencia, calculando la distancia entre éstas mediante el método de transformación de lluvia-escorrentía aplicándose el modelo de la Onda Cinemática junto a los criterios de peligrosidad, para prevenir riesgos y daños, como por ejemplo los siguientes:

- Velocidad del agua (v) < 1.5 m / s
- Calado alcanzado por la lámina de agua (y) < 6 cm
- $v \cdot y$ < 0.5 m² / s

Analizadas las conclusiones que se desprenden de los estudios anteriores [2] [3], para las rejillas limpias y colmatadas se puede proponer una relación potencial entre la eficiencia de captación (E) y el cociente caudal circulante por la rejilla sobre calado de agua inmediatamente antes de la rejilla (Q/y).

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (7.1)$$

Procuraremos realizar el ajuste anteriormente comentado para los resultados cedidos y los obtenidos en los ensayos en el laboratorio, relacionando la eficiencia con el cociente entre el caudal y el calado (Q/y). Se observa en los datos medidos y cedidos, que para caudales bajos aumenta la dispersión de los resultados. Esto es debido a que cuando circula una lámina de agua de unos pocos milímetros, por una plataforma que no es perfectamente lisa, se producen efectos no deseados como torbellinos y resaltos locales que afectan a la fiabilidad de los resultados.

Una vez situados todos los datos experimentales del ensayo de la rejilla Barcelona C3 en una misma gráfica Excel, se realiza el ajuste potencial para obtener la curva de eficiencia de captación (E, Q/y) y los parámetros A y B. Estos resultados se detallan en la Tabla 7.4.7 y 7.4.8, y en la Figura 7.4.9.

Reja nº 5 - BARCELONA	Limpia	C3	Variación
A_{experimental}	0,355	0,230	- 54,35 %
B_{experimental}	0,85	1,003	+ 18,00 %
A_{teórica}	0,348	0,265	- 31,32 %
B_{teórica}	0,815	1,022	+ 25,40 %

Tabla 7.4.7. Resumen de los resultados de los parámetros A y B y su variación respecto al estado ideal limpio.

Reja nº 5 BARCELONA	$\frac{A_{experimental}}{A_{teórica}}$	$\frac{B_{experimental}}{B_{teórica}}$
Reja Limpia	1,020	1,043
Patrón C3	0,868	0,981

Tabla 7.4.8 Variación de los Parámetros A y B, según las aproximaciones teóricas y los resultados experimentales.

Cuando una rejilla sufre algún tipo de colmatación, generalmente el parámetro A disminuye de forma importante, en cambio el parámetro B, tiene tendencia a mantenerse constante o aumentar levemente. Solamente en algunos casos con rejillas gravemente colmatadas (patrón tipo C3), se observa que el valor de B aumenta de forma significativa, pero su variación en valor absoluto respecto al parámetro original, siempre es menor que la que sufre el parámetro A.

La variación de los coeficientes entre la rejilla limpia y el patrón C3, patente en la tabla anterior, también se aprecia en la Figura 7.4.9, donde podemos observar cómo los resultados del ensayo para la rejilla Barcelona con patrón C3 se agrupan alrededor a un nuevo ajuste potencial, teniendo esta curva de eficiencia (E, Q/y) una trayectoria casi paralela y más baja que la curva de eficiencia (E, Q/y) para la misma rejilla en estado limpio. Este resultado es coherente, ya que un estado de colmatación siempre provoca una pérdida de eficiencia captación sobre la rejilla.

[2] Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

[3] Martínez, Pablo. (2000), *Estudio de eficiencia de captación de rejillas y criterios de ubicación en viales urbanos*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

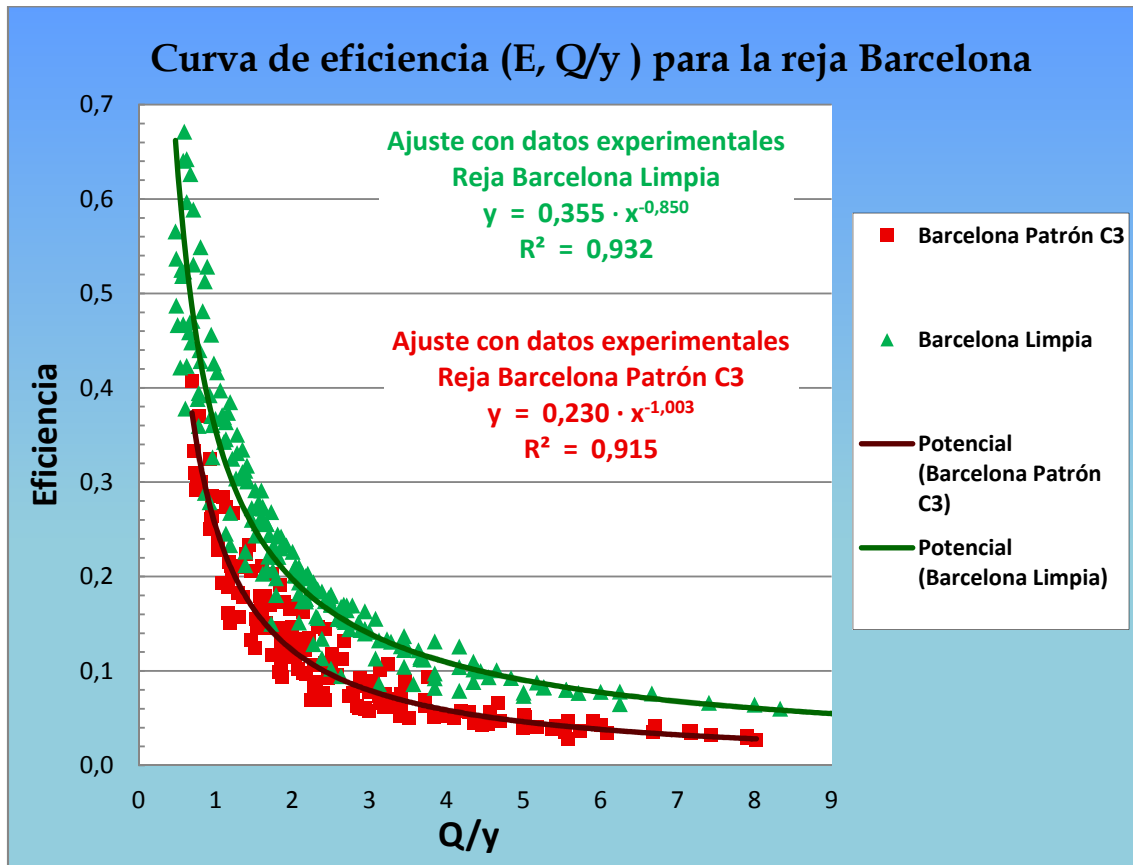


Figura 7.4.9. Curva de eficiencia para la reja Barcelona para su estado limpio y colmatada con el patrón C3.

De la buena relación que se pueda establecer entre estos dos ajustes, depende en gran medida el coeficiente de seguridad, que se otorgará a la ecuación (7.1) en el siguiente capítulo, como medida para prever las posibles variaciones de eficiencia como resultado de la colmatación de la reja.

A continuación, a partir de la formulación descrita en el apartado 5.2 (*Estudio teórico de la influencia de la colmatación en la eficiencia*) y el ajuste potencial descrito anteriormente, podemos definir la curva de eficiencia (E, Q/y) de la reja Barcelona, a partir de los A y B aproximados de forma teórica.

De esta manera, podemos modelizar de forma teórica el comportamiento hidráulico de las rejillas y compararlo con los resultados experimentales (Figura 7.4.10 y 7.4.11).

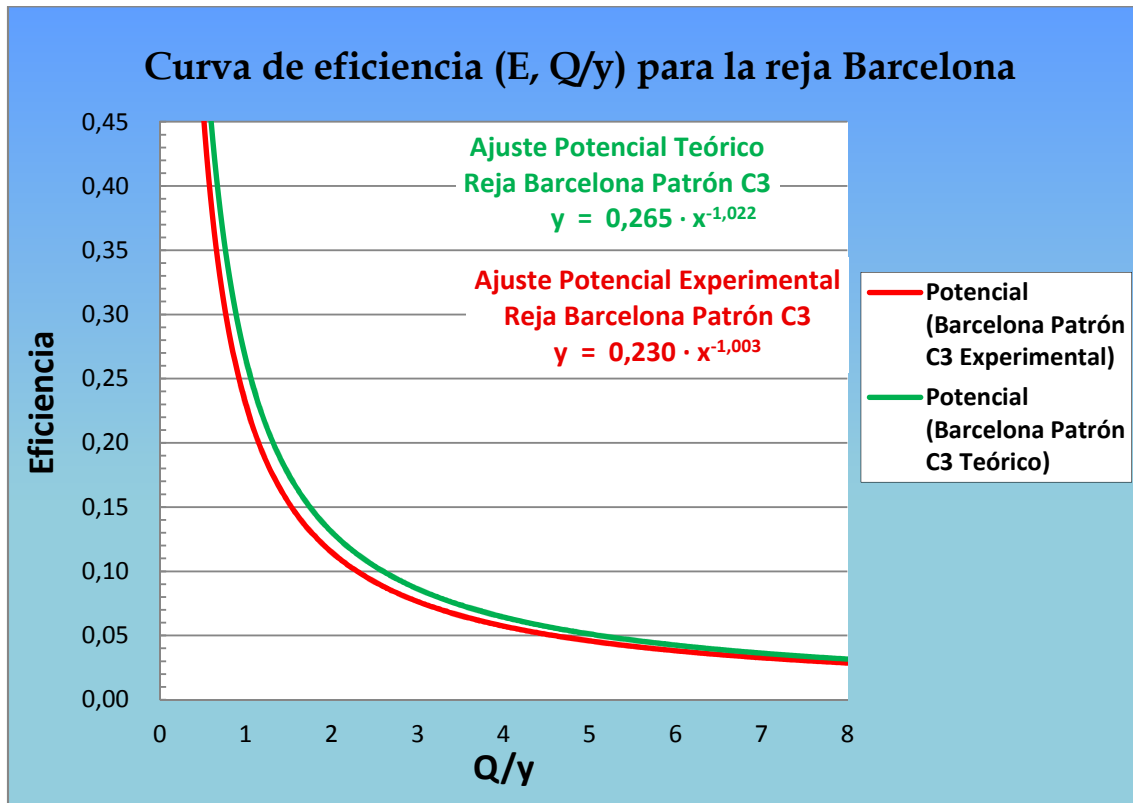


Figura 7.4.10. Curva de eficiencia para la reja Barcelona para su estado con el patrón C3.

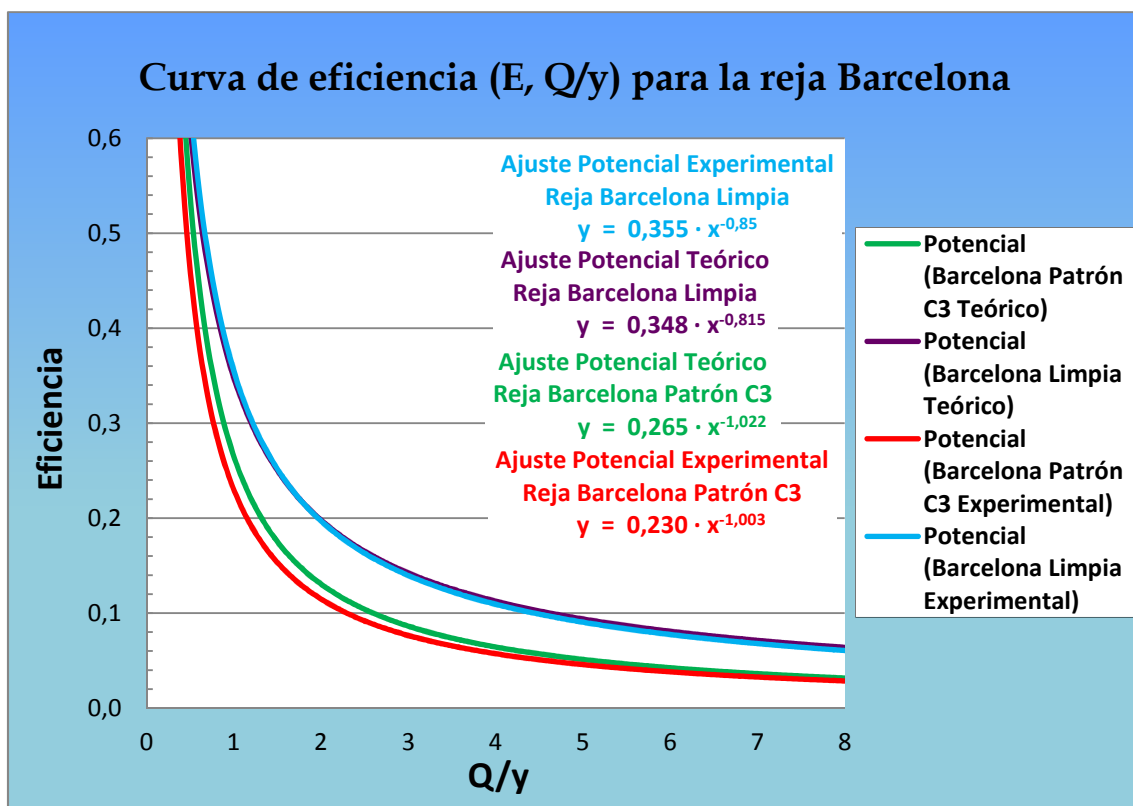


Figura 7.4.11. Resumen curvas de eficiencia para la reja Barcelona para su estado limpio y colmatado con el patrón C3.

Se puede apreciar el muy buen ajuste entre los datos teóricos y los datos experimentales en las figuras anteriores. Ambas formulaciones, la experimental y la teórica, dan unos resultados muy parecidos. Las curvas de eficiencia de captación (E , Q/y) para la reja Barcelona C3 son casi paralelas, con una diferencia menor al 2%. Estos resultados eran de esperar dada la similitud de los parámetros A y B según la Tabla 7.4.8.

Adicionalmente, en la Figura 7.4.11 también se ha añadido el ajuste teórico potencial y experimental para el caso de la reja limpia, donde podemos comprobar para dicha situación, que los resultados teóricos dan una aproximación aún más precisa respecto a los resultados experimentales.

En resumen, podemos concluir que las aproximaciones teóricas de los parámetros A y B dan unos ajustes muy buenos en todos los casos.

Esta nueva metodología, nos permite calcular las curvas eficiencias de captación de rejillas limpias y/o colmatadas, sin la necesidad de emplear recursos y tiempo en hacer ensayos en el laboratorio.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

8. Factores de seguridad en la colmatación de los sumideros

8.1 Situación actual

Dentro del sistema de drenaje de una ciudad, el sistema de sumideros es el encargado de introducir en la red de alcantarillado las aguas de escorrentía producidas por las tormentas caídas. El diseño de dicho sistema de sumideros, la elección de los modelos adecuados y su ubicación es uno de los puntos fundamentales del sistema de drenaje.

La hidráulica de estos sumideros ha recibido atención en los últimos años y cada vez más, los fabricantes proporcionan la capacidad hidráulica de captación de cada sumidero. Pero estos datos suelen ser considerando agua limpia, mientras que en la realidad de la cuenca, numerosos sumideros pueden estar total o parcialmente colmatados, hecho que debería ser tenido en cuenta en los diseños.

A día de hoy, se utilizan los procedimientos descritos en las guías técnicas de diseño hidráulico de una calle, aunque éstas no nos indican como incorporar los problemas que surgen derivados de la colmatación en los cálculos de diseño de los imbornales.

Por ello se ha optado, como manera de proceder ampliamente aceptada [7] [8] [9], aplicar un coeficiente de reducción de carácter empírico que refleja la disminución de la funcionalidad de los sumideros, aplicándose directamente a la capacidad de captación reduciendo ésta en un 50%.

En general, hay disponibles pocas referencias basadas en observaciones científicas y la mayoría se utilizan sin criterio alguno y de forma injustificada.

[7] Artina, S., et al. (2001), *Sistemi di fognature, Manuale di progettazione*. Ed. Hoepli. Milano, Italy.

[8] Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD, 1999), *Hydrologic criteria and drainage design manual*. Clark County Regional Flood Control District. Las Vegas.

[9] Colorado Department of Transportation (CDOT, 2000), *Hydraulic design criteria for highways*. Hydraulic Division Center. Denver, CO.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

8.2 Análisis y definición de coeficientes de seguridad

Como se ha mencionado antes, muchos procedimientos definen los efectos de la colmatación sobre la eficiencia hidráulica, por medio de un factor (c_o), cuyo efecto es reducir la eficiencia hidráulica inicial (Ecuación 8.1).

Aunque por lo general c_o se considera constante, no hay observaciones sobre si la reducción de la eficiencia hidráulica es la misma para cualquier condición de flujo (Q/y).

$$E_{Colmatada} = (1 - c_o) \cdot E_{Limpia} \quad (8.1)$$

Donde:

- $E_{Colmatada}$: eficiencia de la reja colmatada.
- E_{Limpia} : eficiencia de la reja en estado limpio.
- c_o : coeficiente de colmatación de la reja, generalmente considerado como 0,5.

A partir de los resultados de los datos experimentales para las condiciones colmatadas y limpias, nos será posible hallar una relación entre la eficiencia entre el estado limpio de la reja y la que se da en los diferentes estados de colmatación.

Reordenando la expresión anterior obtenemos la relación (Ecuación 8.2) entre la variación relativa de la eficiencia hidráulica y el valor del coeficiente de colmatación c_o . Este coeficiente tomará distintos valores dependiendo de a qué patrón se aplique.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_{Limpia} - E_{Colmatada}}{E_{Limpia}} = c_o \quad (8.2)$$

Las Figuras 8.2.1 y 8.2.2 muestran que la variación eficiencia hidráulica (ΔE) no es la misma para flujos bajos (bajos valores de Q/y) y los flujos altos (altos valores de Q/y).

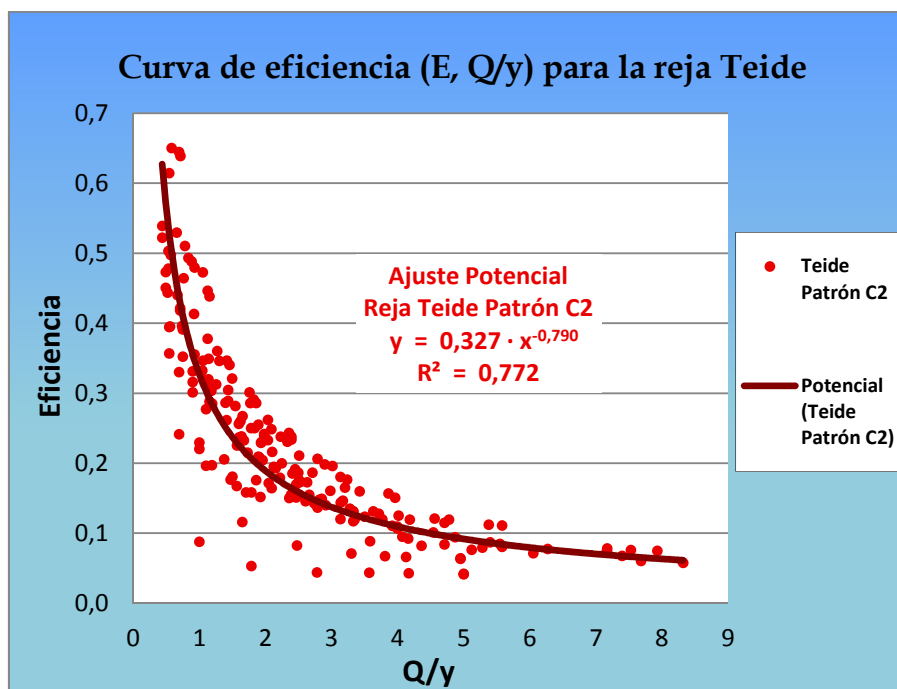


Figura 8.2.1. Ajuste Potencial para la reja Teide con patrón de colmatación C2.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

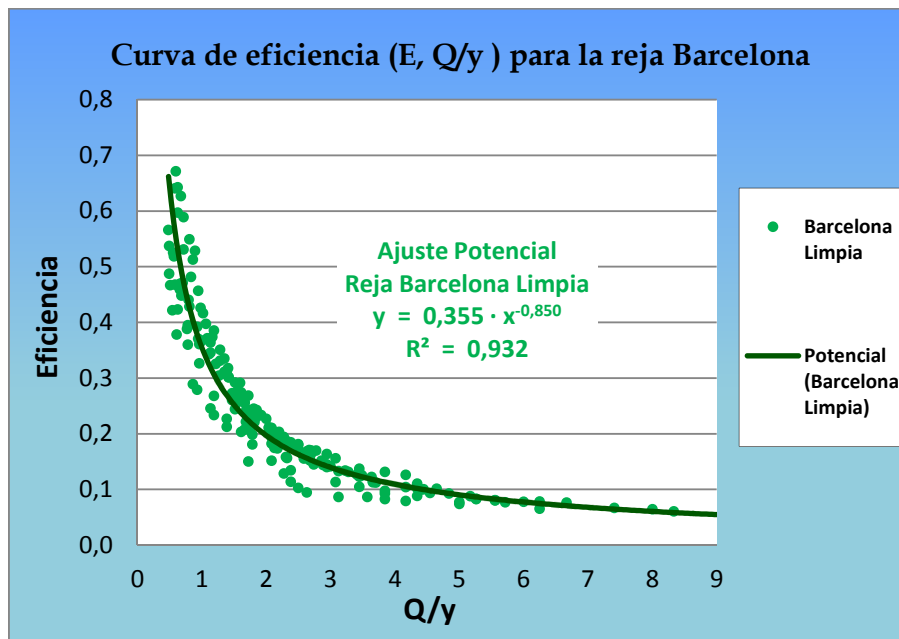


Figura 8.2.2. Ajuste Potencial para la reja Barcelona Limpia.

Al profundizar en el estudio de los datos obtenidos en el laboratorio, se ha comprobado que la pérdida de eficiencia también se puede representar mediante una expresión de tipo potencial $\Delta E/E$ frente al parámetro Q/y [10], hecho que nos permite analizar la variación relativa de eficiencia de la reja al colmatarse, frente a diferentes condiciones de flujo o geometrías de la calle (Figura 8.2.3 hasta Figura 8.2.6).

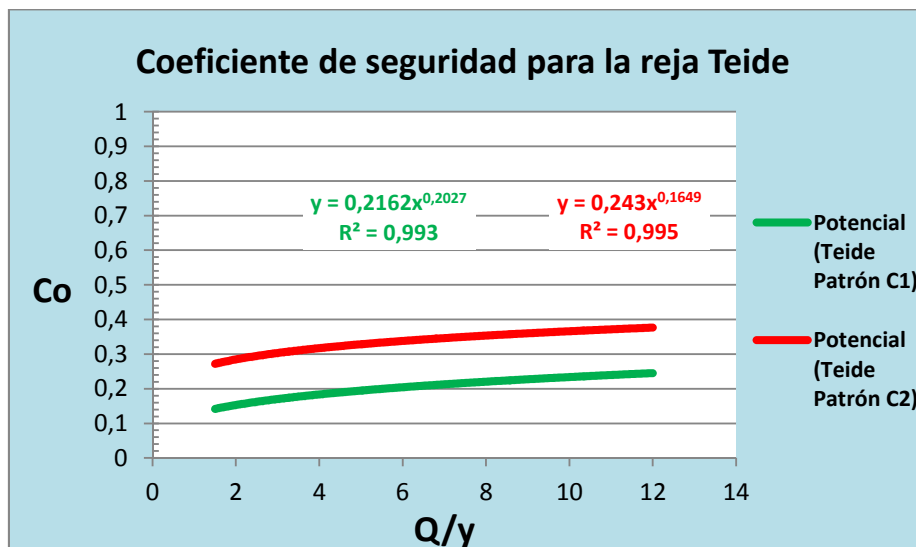


Figura 8.2.3. Variación $Co = \Delta E/E$ frente Q/y para la reja Teide.

[10] Gómez, M., Hidalgo, G. y Russo, B. (2012), *Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona*. Urban Water Journal. Vol. 10, n. 1, pp. 51-60.
DOI:10.1080/1573062X.2012.690435.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

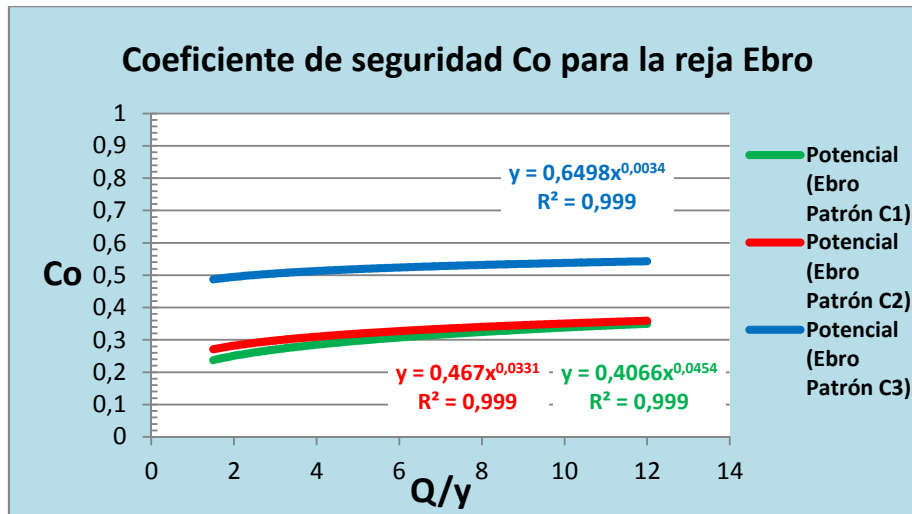


Figura 8.2.4. Variación $C_o = \Delta E/E$ frente Q/y para la rejilla EBRO.

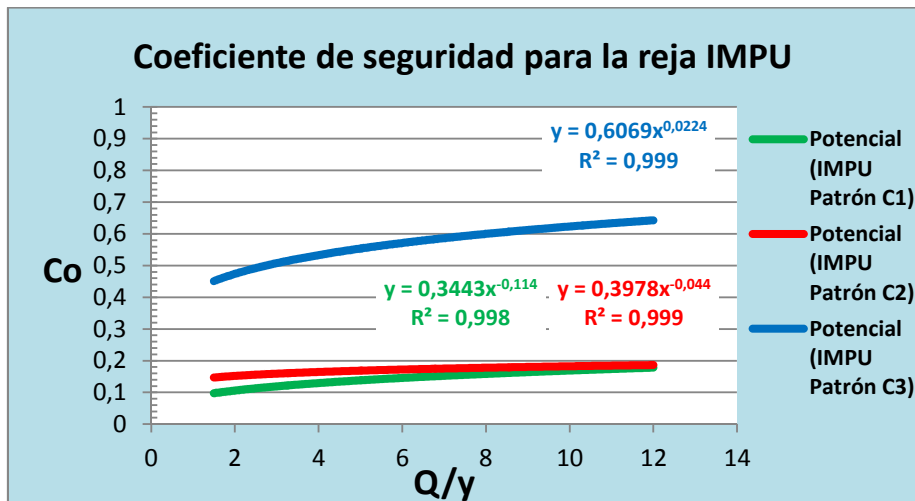


Figura 8.2.5. Variación $C_o = \Delta E/E$ frente Q/y para la rejilla IMPU.

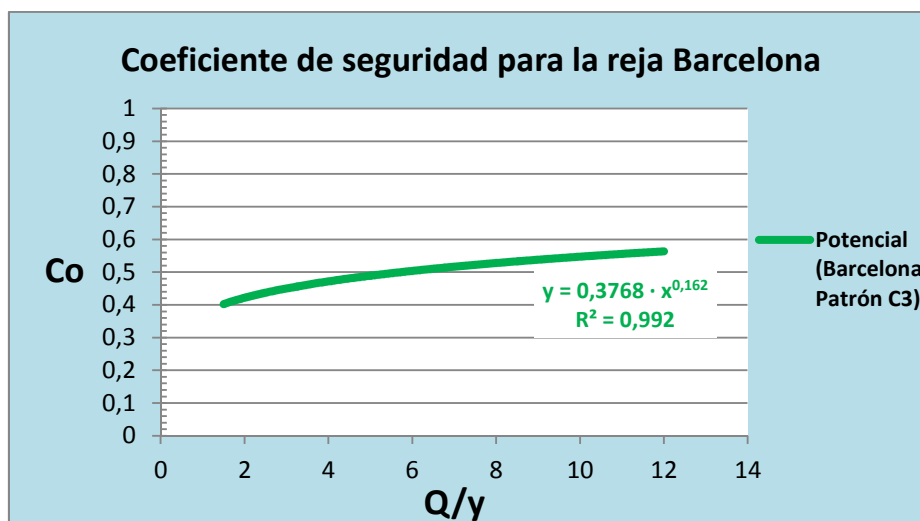


Figura 8.2.6. Variación $C_o = \Delta E/E$ frente Q/y para la rejilla Barcelona.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

Es importante remarcar que para el rango de flujo estudiado ($Q/y=1,5$ hasta $Q/y = 12$), la relación $\Delta E / E = C_o$ no varía mucho (sobre todo a partir de $Q/y = 8$), por lo tanto podemos afirmar que a medida que el factor Q/y aumenta, la relación $\Delta E / E = C_o$ tiende hacia un valor constante. Además, las condiciones más exigentes para evaluar el comportamiento de las rejas, las de diseño del sistema de captación, se harán para tormentas de periodo de retorno alto, 10 años por ejemplo, lo que supone relaciones Q/y altas, del orden 10, 12 ó más.

Este ajuste potencial ($\Delta E / E$, Q/y) nos permite para cada patrón de colmatación propuesto, cuantificar de una forma rápida la variación que sufre la eficiencia por la colmatación de la reja. Nos interesa en especial evaluar el comportamiento para los caudales de circulación por la calle del mismo periodo de retorno que la tormenta de proyecto.

Para el diseño de las redes de drenaje en Barcelona, se considera una tormenta de diseño con un periodo de retorno de $T=10$ años. Dicha tormenta de diseño considera intensidades medias horarias de cerca de 60 mm/h durante una hora, e incluso puntas más altas en ese intervalo de tiempo (valores de 150 mm/h durante 10 min usados en la lluvia de proyecto de Barcelona) que corresponden a valores Q/y de entre 8 y 10, e incluso más.

La Tabla 8.2.7 resume los valores a aplicar para realizar los cálculos de eficiencia en cada reja colmatada para valores de flujo $Q/y = 10$.

$C_o = \Delta E / E$	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
Reja nº3 IMPU	0,265	0,36	0,639
Reja nº5 BARCELONA	-	-	0,545
Reja nº6 TEIDE	0,343	0,36	-
Reja nº7 EBRO	0,451	0,504	0,655

Tabla 8.2.7. Valores $\Delta E/E = C_o$ de reducción de la eficiencia, para los 3 patrones de colmatación, asumiendo condiciones de flujo $Q/y = 10$.

Otro punto a destacar es que los factores de colmatación no son los mismos para todos los tipos de rejas. Algunos tipos pueden ser más propensos a experimentar condiciones de obstrucción más graves que otros, y el uso de un mismo factor de colmatación no es apropiado.

La reja IMPU muestra un factor de colmatación entre 0,265 y 0,639 mientras que la reja Ebro entre 0,451 y 0,655. En algunos casos los valores están por encima y por debajo del factor habitual 0,5. La consecuencia es que la capacidad hidráulica individual de la reja, podría ser subestimada o sobreestimada si se utiliza el valor estándar $c_o = 0,5$.

Es importante destacar que el valor del coeficiente de seguridad $c_o = 0,5$ aceptado con gran consenso y tomado de forma genérica en toda la cuenca, es demasiado conservador para el caso de cálculos globales en una cuenca.

Tal y como vemos en la tabla de frecuencias de aparición de patrones (Tabla 8.2.8), estos casos graves de colmatación ocurren de forma poco frecuente ($\leq 10\%$) y por lo tanto, el criterio de tomar un $c_o = 0,5$ para toda la cuenca no es razonable.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

Modelo Sumideros	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
Reja nº 1: E5	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 2: R-121	18,37%	19,39%	0,00%
Reja nº 3: IMPU	28,95%	23,68%	7,89%
Reja nº 4: Meridiana	0,00%	0,00%	0,00%
Reja nº 5: Delta/Barcelona	0,00%	7,48%	2,55%
Reja nº 6: Teide	40,00%	49,09%	0,00%
Reja nº 7: Onda/Ebro	75,54%	15,11%	4,32%

Tabla 8.2.8. Valores de las frecuencias de aparición de los patrones C1, C2 y C3 para las rejillas más comunes de la cuenca de Sant Martí.

Hay que tener presente, que todo este desarrollo del coeficiente de seguridad c_0 en base a resultados experimentales, también se puede desarrollar con los resultados de las aproximaciones teóricas, dando unos valores $\Delta E/E = c_0$ recogidos en la Tabla 8.2.9 para valores de flujo $Q/y=10$, que aunque no sean tan fiables como los valores reales, son bastante aproximados en caso de no tener datos experimentales.

$c_0 = \Delta E/E$	Patrón C1	Patrón C2	Patrón C3
Reja nº3 IMPU	0,167	0,182	0,62
Reja nº5 BARCELONA	-	0,004	0,499
Reja nº6 TEIDE	0,232	0,365	-
Reja nº7 EBRO	0,336	0,35	0,538

Tabla 8.2.9. Valores $\Delta E/E = c_0$ teóricos de reducción de la eficiencia, para los 3 patrones de colmatación, asumiendo condiciones de flujo $Q/y = 10$.

8. Factores de seguridad en la colmatación de sumideros

8.3 Metodología propuesta

El objetivo de esta tesina es fijar una metodología para determinar cuantitativamente, la reducción de la eficiencia hidráulica de las rejillas parcialmente colmatadas. Con este objetivo, se definieron los patrones de colmatación de los sumideros más comunes en Barcelona y se llevaron a cabo pruebas experimentales a escala real, con el fin de determinar la reducción de la eficiencia hidráulica.

Uno de los problemas más importantes relacionados con la red de drenaje superficial, es cuantificar la modificación de su eficiencia debido a los fenómenos de colmatación.

El factor de colmatación se aplica multiplicando la eficiencia hidráulica teórica por un factor (≤ 1), que representa las condiciones reales. Los valores de 0,5 se encuentran comúnmente en la bibliografía, pero la mayoría de las veces, este valor no se basa en las observaciones científicas. Se trata de un factor de seguridad, como en otros enfoques de ingeniería, que asume que esta reducción será similar a la que ocurre en la realidad.

A continuación, se presenta la metodología seguida para considerar los efectos hidráulicos sobre el sumidero derivados de la colmatación.

El primer paso fue determinar los patrones de colmatación a partir de la observación real de las entradas colmatadas, incluyendo polvo, escombros y obstáculos (coches, contenedores de basura, etc.), tratando de definir si las entradas colmatadas muestran patrones repetitivos a lo largo de las cuencas de drenaje.

Al mismo tiempo, se determinó la frecuencia de aparición de cada uno de los patrones de colmatación reconocidos en la cuenca analizada. Un objetivo adicional fue observar si había alguna distribución espacial de los patrones asociados con la presencia de sólidos, polvo, etc.

Por último, mediante ensayos de laboratorio se obtuvo la pérdida real de la eficiencia hidráulica para cada tipo de sumidero, de acuerdo con cada patrón de colmatación observado, y la propuesta de factores de reducción (para cada rejilla y patrón de colmatación) para después ser utilizados en el estudio del flujo del agua en la calle y en la disposición de las rejillas.

La metodología seguida puede ser utilizada para las evaluaciones hidráulicas de otras rejillas y cuencas con características similares, aunque la generalización del método debe ser considerada cuidadosamente, dependiendo del tamaño y la geometría de la rejilla, y del clima y la morfología de la cuenca.

9. Conclusiones

En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento frente a colmatación de los sumideros existentes en la cuenca urbana de Sant Martí. La información base correspondiente al inventario inicial del sistema de sumideros fue proporcionada por la empresa de gestión del alcantarillado de Barcelona, CLABSA (Clavegueram de Barcelona S.A.), en la actualidad BCASA, Barcelona Ciclo del Agua S.A..

Dicho inventario se ha completado con visitas de campo e inspecciones a lo largo de toda la cuenca, para verificar los errores existentes y confirmar posibles faltas de información.

Una vez se ha completado el inventario de los sumideros existentes en la cuenca urbana de estudio (Sant Martí) y se ha realizado la clasificación de estos según modelos, se ha observado que:

- Se recomienda una actualización del inventario digital actual a medida que se realizan obras, al modificarse la ubicación, los modelos y su número.
- Algunas rejas presentan una colmatación debida a su incorrecta disposición, taponándose orificios con cemento o asfalto ya sea durante su colocación en la vía pública o en asfaltados posteriores.
- En otros casos, el diseño de las calles no siempre contempla una correcta colocación de las rejas, ubicándolas en esquinas donde les resulta imposible la captación de agua o debajo de mobiliario urbano (contenedores de basura). Sería interesante una revisión de la ubicación de las rejas con criterios hidráulicos.
- En un modelo de sumidero no siempre se presentará un mismo patrón de colmatación, sino que existen varios patrones para un mismo modelo, siendo algunos de éstos, evoluciones en el tiempo de un mismo patrón.
- Los resultados obtenidos muestran que las rejas R-121, IMPU, Barcelona, Teide y Ebro presentan patrones de colmatación claros. En cambio, las rejas E5 y Meridiana no tienen ningún problema debido a colmatación y no presentan patrones característicos en ninguna situación.

Las rejas que sufren graves problemas de colmatación son las rejas Ebro, Teide e IMPU debido a que fueron instaladas hace más tiempo (30 años) y a su diseño geométrico más propenso a colmatarse. Las rejas con menos problemas son la reja E5, Meridiana y Barcelona, modelos que en general han sido instalados más recientemente (5-10 años) y demuestran tener unas características geométricas más favorables que dificultan más su colmatación.

- Todos estos resultados son coherentes respecto a otros estudios que tuvieron en cuenta el proceso de colmatación, en 5 de nuestras 7 rejas consideradas. En concreto, las formas y frecuencias de los patrones de colmatación para cada modelo son similares. Dichos estudios también concluyen que las rejas más perjudicadas por la colmatación son (de mayor a menor): Ebro, Teide e IMPU.
- Se ha confirmado que los patrones de colmatación se producen siguiendo una distribución uniforme en toda la superficie, y repartidos con independencia de la pendiente que domine la calle en que se encuentren. Es decir, la pendiente de la calle no afecta en la forma del patrón de colmatación aunque sí pueda afectar en la rapidez de su aparición y en el tiempo que tarde la reja en pasar de un patrón a otro.
- Aunque se preveía un aumento de los niveles de colmatación durante el mes de agosto y el resto de la estación seca y pre-otoñal, debido a la ausencia de lluvia, a la caída de las hojas de los árboles y a la reducción temporal de los servicios de limpieza, no se ha observado ninguna diferencia respecto la estación húmeda. La conclusión es que este fenómeno se da con la misma intensidad durante todo el año y que la escorrentía provocada por las lluvias, no afecta ni al tipo de colmatación ni a su frecuencia de aparición.

- Resultaría provechoso que durante el periodo vacacional, al reducirse el número de coches estacionados en la calle, se incrementara la limpieza específica de las rejjas. De esta manera, se evitaría que se produjeran los patrones de colmatación más graves (C3) y a la vez, se podrían limpiar patrones que se dan comúnmente durante todo el año (C1 y C2).

Definidos los patrones de colmatación observados en la cuenca, se ha procedido al ensayo hidráulico de la capacidad de captación de las rejjas seleccionadas con los patrones de colmatación identificados.

Después de analizar los resultados obtenidos a partir de los ensayos de las rejjas TEIDE y BARCELONA, se ha observado que:

- Todos los patrones de colmatación de una reja que se den en una vía pública producen una reducción de la eficiencia de captación de ésta.
- No hay diferencia significativa, en términos de reducción de eficiencia, entre los patrones de colmatación C1 y C2 de la reja Teide a pesar de tener áreas colmatadas sensiblemente diferentes.
- Se confirmó una vez más que a partir de los datos experimentales, un ajuste potencial puede ser usado para representar el comportamiento hidráulico de rejjas limpias y parcialmente obstruidas.
- Los parámetros A y B, base del ajuste potencial, se pueden relacionar con las diferentes características geométricas de las rejjas, como por ejemplo la longitud, el ancho, el área de huecos (A_h) o el área mínima que engloba a los huecos (A_g) y sufren variaciones cuando las rejjas se colmatan.

En concreto el parámetro A disminuye de forma importante y progresiva con la colmatación, mientras que el parámetro B tiene la tendencia de mantenerse estable en las primeras etapas de colmatación, mientras que después tiende a aumentar cuando la geometría de la reja se ve gravemente alterada por los patrones de colmatación más severos.

- Existe un buen ajuste entre la aproximación teórica y los datos experimentales. La aproximación teórica consiste en calcular los parámetros A y B del ajuste potencial a partir de las características geométricas de la reja, sin la necesidad de datos experimentales.

En los patrones ensayados, la aproximación teórica tiene en cuenta de forma adecuada la influencia que ejerce la colmatación de la reja en su eficiencia, dando unos resultados muy parecidos a los resultados de los ensayos.

Las curvas de eficiencia de captación (E , Q/y) son paralelas y casi coincidentes debido a la similitud de los parámetros A y B.

Esta nueva metodología, nos permite calcular las curvas de eficiencias de captación de rejjas limpias y/o colmatadas, sin la necesidad de emplear recursos y tiempo en hacer ensayos en el laboratorio.

- La variación relativa de eficiencia entre el valor asociado a la reja limpia y la reja colmatada con los patrones observados, se puede representar mediante una expresión de tipo potencial, $\Delta E/E$, frente al parámetro Q/y. Esto permite para cada patrón de colmatación propuesto, C1, C2 y C3, cuantificar de una forma sencilla con una expresión matemática la variación de eficiencia debida a la colmatación. Dicha variación la expresaremos con el factor c_o cuyo efecto será reducir la eficiencia hidráulica inicial.

$$E_{Colmatada} = (1 - c_o) \cdot E_{Limpia} \quad \frac{\Delta E}{E} = \frac{E_{Limpia} - E_{Colmatada}}{E_{Limpia}} = c_o$$

- Se ha realizado también el análisis de la variación relativa de eficiencia de la reja al colmatarse frente a diferentes condiciones de flujo o geometría de la calle, expresada a través del parámetro Q/y . Pues bien, dicha expresión de la variación relativa de eficiencia $\Delta E/E$ se observa que es casi constante para flujos altos (Q/y altos). Estas situaciones de circulación de altos flujos por la calle, son típicas con las lluvias del clima Mediterráneo.
- Otro punto a destacar es que los factores de colmatación o de reducción de la eficiencia (c_0) no son los mismos para todos los tipos de rejass. Algunas rejass pueden ser más propensas a experimentar condiciones de obstrucción más graves que otras, y el uso de un mismo factor c_0 no es apropiado.
Es importante destacar que el valor del coeficiente de seguridad $c_0 = 0,5$ aceptado con gran consenso y tomado de forma genérica en toda la cuenca, es demasiado conservador para el caso de cálculos globales en una cuenca.

- Los resultados obtenidos en el laboratorio para la reja BARCELONA son:

Reja nº 5 BARCELONA	Reja Limpia	Patrón C3
A	0,355	0,230
B	0,850	1,003
c_0	0	0,545

Y para la reja TEIDE son:

Reja nº 6 TEIDE	Reja Limpia	Patrón C1	Patrón C2
A	0,425	0,340	0,327
B	0,714	0,800	0,790
c_0	0	0,343	0,360

Los tipos de rejass analizadas en este trabajo son muy comunes en Barcelona y otras ciudades del Mediterráneo. Específicamente los resultados obtenidos podrían ser extrapolables a otros tipos sumideros instalados en otras ciudades de España y Portugal, o de otros países del sur de Europa.

Diversas campañas de estudios de campo para encontrar factores de colmatación típicos (c_0), podrían minimizar los efectos de la colmatación en la red de alcantarillado con la selección de los mejores modelos de rejass.

Estos factores se pueden utilizar en la evaluación de nuevos diseños de sistemas de drenaje, ya que representan la disminución real verdadera de la capacidad de la reja, y no sólo un valor aproximado.

10. Referencias bibliográficas

Artina, S., et al. (2001), *Sistemi di fognature, Manuale di progettazione*. Ed. Hoepli. Milano, Italy.

Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD, 1999), *Hydrologic criteria and drainage design manual*. Clark County Regional Flood Control District. Las Vegas.

Colorado Department of Transportation (CDOT, 2000), *Hydraulic design criteria for highways*. Hydraulic Division Center. Denver, CO.

Gómez, Manuel. (2008), *Curso de Hidrología Urbana*. Grup de Recerca FLUMEN, Ed. Alfambra. Barcelona.

Gómez, M., González, J. y Guerra, W. (1997 y 2002), *Informes de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las rejillas más comunes de Barcelona*. (Estudios realizados a petición de CLABSA). Departamento de Hidráulica de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Gómez, M., Hidalgo, G. y Russo, B. (2012), *Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona*. Urban Water Journal. Vol. 10, n. 1, pp. 51-60. DOI:10.1080/1573062X.2012.690435.

Gómez, M. y Russo, B. (2005), *Comparative study among different methodologies to determine storm sewer inlet efficiency from test data*. Proc. 10 Conference on Urban Drainage. Copenhagen. ISBN 87-89220-80-3.

Gómez, M. y Russo, B. (2006), *Análisis de la capacidad hidráulica de la rejilla Barcelona del grupo Norinco*. (Estudio realizado a petición de la Fundación Agbar). Grup de Recerca FLUMEN, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Gómez, M. y Russo, B. (2011), *Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets*. Institution of Civil Engineering, Water Management. Volume 164, n. 2, pp. 81-90.

Hidalgo, Guillem. (2009), *Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

James, C. Y. Guo (2006), *Design of street curb opening inlets using a decay-based clogging factor*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 132, n. 11, pp. 1237- 1241.

Martínez, Pablo. (2000), *Estudio de eficiencia de captación de rejas y criterios de ubicación en viales urbanos*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Mur Abad, María José. (2002), *Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja/imbornal*. Tesina de especialidad de la ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.

Russo, B. (2010), *Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding in urban areas*. PhD thesis. ETSECCPB. U.P.C. Barcelona.